

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL USO DE COLECTORES SOLARES EN UN
CICLO DE COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

JULIO CÉSAR ORTEGA ARDILA

Trabajo de Grado

Presentado como requisito para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

Orientador

Prof. JUAN CAMILO LÓPEZ RESTREPO M. Sc.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Facultad de Ingeniería Mecánica

Pereira, Diciembre de 2020

AGRADECIMIENTOS

El progreso de mi vida personal, académica, profesional y espiritual es debido al soporte de Dios en mi existir. Él siempre me ha sostenido en los momentos de triunfo y en los más difíciles de mi vida. A Él quiero dar mis agradecimientos más profundos.

A mi familia en general, especialmente a mi padre a quien amo y a quien quiero ver siempre feliz y satisfecho. Gracias a él por los valores, las virtudes calcadas en mí y su buen ejemplo para salir adelante y perseverar.

A Ana Cecilia, quien siempre me ha apoyado y ha estado ahí. Una mujer de gran corazón que se ha portado como una madre conmigo.

A mi hermano Alejandro Ortega quien ha sido un ejemplo de vida para mí, a quien amo con todo mi corazón. Gracias a él por ser ese amigo que no se encuentra en ningún lugar.

A Katherine Gutiérrez por su apoyo incondicional, por levantarme el ánimo, por su paciencia, amor, dedicación y principalmente ser ese sostén que Dios me ha concedido.

A la Universidad Tecnológica de Pereira, porque gracias a esta hermosa institución, logré descubrir mi vocación

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Básicas quienes me aportaron pasión, formación y ética.

Especialmente al profesor Juan Camilo López Restrepo quien fue el orientador de este proyecto. Gracias a él por su apoyo, orientación y compromiso con el desarrollo del trabajo.

Al profesor Álvaro Restrepo por su disponibilidad, por compartir sus conocimientos con gusto y pasión. Gracias por el gran apoyo brindado en este proyecto.

A Jayson Londoño por su amistad, confianza y disponibilidad al compartirme sus experiencias laborales.

A Lazos de Amor Mariano, quienes me han dado al regalo que al fin ha traído plenitud a mi vida: Dios.

A mis amigos y a todas las personas que han estado compartiendo un poco de mi vida conmigo, especialmente estos años decisivos para mi vida futura.

RESUMEN

Mediante este proyecto se realiza un Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) en un ciclo de cogeneración de un ingenio de la industria azucarera. Este análisis está asociado al uso de sistemas de recolección solar con colectores tipo Lineal Fresnel, con el fin de aprovechar una fuente de energía prácticamente inagotable: el sol. Ya que se pretende mejorar la eficiencia del ciclo mediante el precalentamiento del agua de alimentación en los generadores de vapor, y reducir el consumo de combustible.

El LCA se desarrolla siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14040 para la evaluación de impactos ambientales asociados a un proceso. Es decir, mediante este análisis se pretende dar respuesta a cuál es el impacto ambiental asociado a implementar colectores solares en un ciclo de cogeneración de un ingenio de la industria azucarera. El uso de un campo de recolección solar refleja ahorro en el combustible y por tanto, ahorro en emisiones de CO₂, el LCA da respuesta cuántos kg de CO₂ equivalente se dejan de emitir debido al uso de los colectores.

Para el análisis se tiene en cuenta dos combustibles utilizados en la unidad de generación: bagazo producido por el mismo ingenio, y carbón térmico. Se establece como unidad de referencia la producción de una tonelada de vapor de agua, así los resultados estarán en función de dicha unidad.

En LCA es realizado mediante el software OpenLCA con sus bases de datos gratuitas. Los resultados muestran una reducción del 8,8 % de emisiones de CO_{2-eq} por cada tonelada de vapor de agua generada, es decir que el uso de colectores solares alcanza una reducción de 77 kg CO_{2-eq} y en términos de acidificación en 0,657 kg SO_{2-eq} por tonelada de vapor.

Además se expone que los procesos con mayor impacto ambiental, en términos de CO_{2-eq}, asociado son los relacionados con la producción de bagazo y su combustión.

Queda como propuesta realizar análisis económicos y de factibilidad con el fin de obtener resultados de costo/beneficio, ya que para el mismo ingenio se cuentan con análisis energéticos y exergéticos para el mismo caso de estudio.

ABSTRACT

Throughout this project, a Life Cycle Analysis (LCA) is carried out to assess the integration of Linear Fresnel solar collectors in a cogeneration cycle of the sugarcane industry. This analysis is conducted to evaluate the use the solar energy to preheat the feedwater of the steam generators, reduce the fuel consumption, and to improve the efficiency of the cycle.

The LCA is developed based on the recommendations of the standard ISO 14040. Which aims to evaluate the environmental impacts of a process. This analysis aims to assess the environmental impact regarding to the use of solar thermal collector in a cogeneration cycle in the sugar industry. The use of solar collectors reduces fuel consumption and CO₂ emissions. The LCA allows to determine how many kg of CO_{2-eq} are not emitted since the collectors are used.

Two fuels are used in the steam generators: bagasse and coal. The production of one ton of steam is established as reference unit. Results are expressed on that basis. The LCA is conducted throughout the software OpenLCA and its free databases. Results showed a reduction of 8,8% of CO_{2-eq} emissions per ton of generated steam. It means, the use of solar thermal collectors reduces 77 kg of CO_{2-q} per ton.

Therefore, the results stated that the major environmental impact in terms of CO_{2-eq} is caused by the production of bagasse and its combustion. To carry out and economic and feasibility analysis is proposed to obtain a cost/benefit assessment of the proposal, since the energy and exergy analysis were carried out for the same case study.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general:	3
1.1.2 Objetivos específicos:	4
1.2 Aporte del trabajo	4
CAPÍTULO II	5
2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	5
2.1 Energía solar	5
2.2 Colectores solares	6
2.2.1 Colectores lineal Fresnel	7
2.2.2 Colectores cilindro parabólico.....	9
2.2.3 Colectores disco parabólico.....	9
2.2.4 Colectores sistema torre central	10
2.3 Planta de cogeneración	11
2.4 Planta de cogeneración objeto de estudio	13
2.5 Análisis de ciclo de vida.....	14
CAPÍTULO III	16
3 MARCO METODOLÓGICO.....	16
3.1 Análisis de ciclo de vida para la planta de estudio	18
3.1.1 Definición del alcance del análisis del ciclo de vida.....	18
3.1.2 Elaboración del análisis de inventario para el bagazo.....	20
3.1.3 Elaboración del análisis de inventario para el carbón	31
3.1.4 Evaluación del impacto ambiental	36

CAPÍTULO IV38

4 RESULTADOS.....38

4.1 Interpretación del LCA.....39

CAPÍTULO V47

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....47

BIBLIOGRAFÍA.....49

ANEXOS.....54

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1 Colector solar no concentrador de placa plana	6
Fig. 2. Colector solar no concentrador de tubos de vacío	7
Fig. 3. Colector Linear Fresnel.....	8
Fig. 4. Pérdidas ópticas. (a) Por sombreado, bloqueo y efecto coseno. (b) Por el área vacía entre espejos	8
Fig. 5.Colector solar Cilindro Parabólico.....	9
Fig. 6. Colector Disco Parabólico	10
Fig. 7. Colector Torre Central	10
Fig. 8. Ciclo Rankine. a. Sin cogeneración. b. Con cogeneración	12
Fig. 9. Ciclo de cogeneración del sector azucarero.....	13
Fig. 10. Descripción del Análisis de Ciclo de Vida (LCA).....	15
Fig. 11. Alcance del LCA. a. sin colectores, b. con colectores.	19
Fig. 12. Iteración del Inventario de Ciclo de Vida	21
Fig. 13. Proceso productivo del bagazo	22
Fig. 14. Diagrama de flujo de entradas y salidas para la obtención de bagazo.	22
Fig. 15. Cadena del carbón en Colombia	32
Fig. 16. Flujo de entradas y salidas para el carbón.....	36
Fig. 17. Emisión de kg de CO ₂ por kg de bagazo	40
Fig. 18. Emisión de kg de CO ₂ y SO ₂ por kg de carbón	40
Fig. 19. IPCC GWP 100. Resultados para 1 t de vapor	42
Fig. 20. Resultados GWP 100 para el ciclo de vida del bagazo. Sin colectores	43
Fig. 21. Resultados acidificación para el ciclo de vida del bagazo. Sin colectores	43
Fig. 22. Resultados GWP 100 para el ciclo de vida del carbón. Sin colectores.....	44
Fig. 23. Resultados acidificación para el ciclo de vida del carbón. Sin colectores.....	44
Fig. 24.Resultados con colectores. a) GWP 100 para el ciclo de vida del bagazo. b) acidificación para el ciclo de vida del bagazo. c) GWP 100 para el ciclo de vida del carbón. d) acidificación para el ciclo de vida del carbón.....	45
Fig. 25. Guía del uso del Software OpenLCA	56
Fig. 26. Importar métodos de impacto	57
Fig. 27. Crear un nuevo flujo	58

Fig. 28. Crear tipo de flujo58

Fig. 29. Creación de procesos59

Fig. 30. Proceso creado59

Fig. 31. Entradas y salidas del proceso60

Fig. 32. Creación del producto del sistema.61

Fig. 33. Model graph62

Fig. 34. Método de evaluación de impacto62

Fig. 35. Resultados63

Fig. 36. Árbol de proceso final.....64

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Marco metodológico del proyecto.....	17
Tabla 2. Inventario, herramientas y equipos para labranza del terreno.....	23
Tabla 3. Equipos requeridos para riego.....	24
Tabla 4. Inventario de herbicida y fertilizantes.....	25
Tabla 5. Cantidad de madurador aplicado por área.....	25
Tabla 6. Consumo de combustible para la aplicación de los maduradores.....	26
Tabla 7. Consumo de combustible por transporte en labores de campo	26
Tabla 8. Inventario labores de cosecha	28
Tabla 9. Información preliminar del Inventario de Ciclo de Vida	30
Tabla 10. Consumo total de combustible y agua de los procesos de la caña de azúcar.....	30
Tabla 11. Propiedades químicas del bagazo.....	31
Tabla 12. Propiedades químicas del carbón	34
Tabla 13. Caso base. Condiciones de operación de los generadores de vapor.....	38
Tabla 14. Caso base. Valores de consumo de bagazo y carbón para obtener la unidad funcional.....	38
Tabla 15. Valores de consumo de bagazo y carbón para obtener la unidad funcional con colectores	39
Tabla 16. Inventario de combustión de bagazo. (Unidad funcional: 1 tonelada de vapor de agua).	39
Tabla 17. Inventario de combustión de carbón. (Unidad funcional: 1 tonelada de vapor de agua).	39
Tabla 18. Resultados para 1 t de vapor	41
Tabla 19. Resultado para el bagazo con y sin colectores. GWP - 100 y acidificación terrestre	42
Tabla 20. Inventario de Ciclo de Vida del bagazo (Unidad funcional: 1kg _{bag}).....	54
Tabla 21. Inventario de Ciclo de Vida del carbón (Unidad Funcional: 1kg _{car}).....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_{2-eq}	Huella de carbono
DF	Impactos ambientales asociados a la disposición final de un componente
LCA	Análisis de Ciclo de Vida
\dot{W}_P	Potencia pico. La máxima generada por un conjunto de paneles fotovoltaicos [kW _p]

Subíndices

$C1$	Caldera 1
$C2$	Caldera 2
Col	Coletores solares
Vap	Vapor
Bag	Bagazo
Car	Carbón

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los requerimientos energéticos de las actividades del hombre son cada vez mayores, presentando una mayor demanda de energía según el pasar de los años y de los avances tecnológicos. Cuanto más aumenta la producción en las industrias, más requerimientos energéticos son demandados por las mismas: se busca aumentar el producto de un proceso para aumentar las utilidades, ya que este es un factor importante para el crecimiento económico de un país.

En la gran mayoría de países, sus fuentes principales de energía son no renovables, es decir, son energías basadas en el carbón, el petróleo, el gas natural y la energía nuclear [1]. Durante décadas, el uso de combustibles fósiles como fuente de energía principal ha generado innumerables afectaciones al medio ambiente a nivel global. Es responsabilidad de los entes gubernamentales, la academia y de la sociedad en general, gestionar fuentes de energía renovables, y así, llevar a las economías de los países a no depender de combustibles fósiles como su principal fuente de energía.

Se sabe que la energía proveniente del sol causa gran expectativa al mundo moderno por ser una fuente de energía ilimitada como cantidad total en casi todos los puntos de la tierra [2]. Es entonces pertinente, realizar estudios con un enfoque hacia el cuidado ambiental de los procesos industriales y energéticos de las naciones, y reemplazar, con el tiempo, dichos procesos que requieran combustibles fósiles por energías renovables, como la energía solar.

Específicamente, la industria azucarera en Colombia ha tenido un gran aporte al implementar energías renovables en sus procesos, haciendo que los ingenios reduzcan los recursos fósiles de la matriz energética nacional, ya que usan, por lo general, el bagazo de la caña de azúcar como combustible, aunque normalmente no erradican el carbón en la totalidad de sus procesos. Es necesario buscar más alternativas para mejorar los procesos energéticos de los ingenios, ya que el bagazo no está disponible en todos los meses del año debido a la baja cosecha de caña de azúcar en ciertos meses, haciendo así, que se utilicen para suplir esto, recursos fósiles u otros biocombustibles [3] que generan más gastos económicos y mayor daño al medio ambiente.

Es necesario explotar potencialmente las energías renovables en Colombia, y en este caso la energía solar, ya que, “la mayor parte del territorio nacional cuenta con un buen recurso de brillo solar

(horas de sol), alrededor de 4, 8 y 12 horas de Sol al día en promedio diario anual, los cuales son valores altos en comparación de países como Alemania el cual cuenta con 3 horas de brillo solar.” [4].

La alternativa propuesta es emplear colectores solares térmicos para asistir la operación del ciclo y reducir el consumo de combustible y generar un almacén que permita operar en épocas/momentos de baja cosecha. Una planta de la industria azucarera en Colombia es el objeto de estudio de este proyecto, con el fin de identificar las mejoras energéticas y ambientales al implementar colectores solares en los procesos de cogeneración. Todo esto basado en la norma ISO 14040 [5], la cual orienta el estudio a seleccionar indicadores de desempeño ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida para estudiar su influencia sobre el ciclo de cogeneración objeto de estudio.

En los últimos años, ha habido un objetivo común entre los países en desarrollo y los países en vías de desarrollo: contrarrestar el daño causado al planeta debido al uso y explotación de recursos fósiles. Mientras que los países desarrollados buscan reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), los que están en vías de desarrollo se enfocan más en la necesidad de aumentar la oferta energética y el incremento del acceso a la electricidad en zonas aisladas [6].

Colombia tiene una matriz energética considerada una de la más limpias del mundo ya que, está compuesta, en su mayoría, de fuentes hídricas (El 68,4% de su generación de energía eléctrica hacen parte del recurso hidroenergético, y un 30,6% de fuentes fósiles, es decir, 13,3% con gas natural, 7,8% con combustibles líquidos y 9,5% con carbón) [7]. A pesar de esto, las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR) hacen parte solo el 1% de la generación de energía eléctrica del país [7]. Se debe tener en cuenta que lo anterior es referente a la generación de energía eléctrica, ya que según el Balance Energético Colombiano (BECO) [8], para el 2018 aproximadamente el 66% del uso final de energía terminó siendo de recursos fósiles.

María Alexandra Planas Marti, Especialista Senior de Energía del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), encargada del portafolio de proyectos de energía y Juan Carlos Cárdenas, Economista en la División de Energía del BID en Washington D.C. quien brinda apoyo técnico y operacional al portafolio de proyectos energéticos en América Latina afirman que: “La alta dependencia al recurso hídrico hace al sistema eléctrico colombiano vulnerable ante escenarios de hidrología crítica, como el ‘fenómeno de El Niño’. Durante los períodos de normalidad hidrológica, la generación hidráulica está en capacidad de abastecer cerca del 85% de la demanda. En contraste,

durante períodos secos, como 2.009-2.010 y 2.015-2.016 afectados por el fenómeno de El Niño, las fuentes de generación térmica cubrieron casi el 50% de la demanda, incurriendo en altos costos de generación y mayores emisiones de gases efecto invernadero” [7].

Por lo anterior, es necesario implementar en mayor medida las FNCER para que el consumo energético del país no sea vulnerable a las hidrologías críticas como el fenómeno de El Niño. Por ejemplo, la FNCER más desarrollada en Colombia es la biomasa, específicamente el bagazo de la caña de azúcar (fuente energética principal del ingenio azucarero objeto de estudio) [9].

Se puede notar que, en Colombia es necesario aprovechar al máximo la gran cantidad de fuentes de energías renovables que posee; los avances con la biomasa han generado gran impacto económico, energético y ambiental. Sin embargo, una importante FNCER, como la energía solar, no es lo suficientemente explotada, y los ciclos de cogeneración del sector azucarero pueden ser mejorados a partir de la energía solar mediante colectores solares. Se deben promover este tipo de proyectos que buscan estudiar el impacto ambiental al implementar energías renovables en la industria energética del país, como lo es el ciclo de cogeneración objeto de estudio, para la mejora de la matriz energética colombiana, ya que se espera que para el año 2.031, estas fuentes representen entre el 13% y el 18% de la generación del sistema eléctrico [7].

Estudios han revelado para la planta de estudio, que la implementación de colectores solares para el ciclo de cogeneración mejora la eficiencia desde un 68,71% hasta un 75% [3]. Sin embargo, surge la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es el impacto ambiental derivado del uso de colectores solares térmicos en una planta de cogeneración de la industria azucarera?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general:

Realizar un análisis del ciclo de vida para determinar el impacto ambiental asociado al uso de colectores solares en un ciclo de cogeneración en la industria azucarera.

1.1.2 Objetivos específicos:

1. Seleccionar indicadores de desempeño ambiental necesarios según la norma ISO 14040 para evaluar el impacto ambiental asociado a la operación del ciclo de cogeneración objeto de estudio.
2. Identificar y recopilar las entradas y salidas que generen impactos ambientales al usar colectores solares en un ciclo de cogeneración en la industria azucarera.
3. Realizar un análisis de ciclo de vida del ciclo de cogeneración usando colectores solares, según la norma ISO 14040.
4. Analizar los resultados obtenidos del análisis del ciclo de vida y así determinar el impacto ambiental de los colectores solares y su influencia sobre el desempeño ambiental del ciclo de cogeneración.

1.2 Aporte del trabajo

La realización de un LCA abarca el conocimiento de un sistema y/o productos, plantea mejoras en sus flujos y mejoras en los subprocesos. Mediante el desarrollo de este proyecto, el aporte más significativo desde el campo de la ingeniería es brindar estudios nuevos para la mejora de los procesos de un ingenio azucarero, especialmente la transición entre la energía producida por biomasa y combustibles fósiles, a energías renovables y, al mismo tiempo, mejorar la eficiencia en los sistemas. Así como aportar estudios ambientales al mismo sector de la industria azucarera.

2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Para el desarrollo del LCA es necesario conocer cada entrada y salida de los dispositivos o procesos que se quieran analizar [5]. A continuación, se presenta una descripción de los conceptos básicos necesarios para llevar a cabo el LCA.

2.1 Energía solar

En este trabajo una entrada importante es la energía solar, la cual es limpia, prácticamente inagotable, y principalmente, es una fuente de energía renovable. Los avances tecnológicos relacionados con la energía solar tienen el potencial de impactar a una variedad de partes interesadas, como plantas de energía, compañías eléctricas y fabricantes de equipos [10].

La energía que llega a la tierra proveniente del sol es transferida primero al espacio mediante radiación. Posteriormente, parte de esa energía es recibida por la tierra; sin embargo, antes de que esta energía sea absorbida, reflejada y distribuida en el planeta, primero debe atravesar la atmósfera [11]. No obstante, la radiación que llega a la tierra está dividida básicamente en dos, la radiación directa y la radiación difusa, dicha división depende de la transferencia de radiación a través de la atmósfera., influenciada por las nubes, aerosoles y gases ya que estos disminuyen la radiación total y aumentan la fracción difusa mediante su dispersión por la atmósfera [12].

Como se ha mencionado en el Capítulo I, es necesario invertir en avances tecnológicos para la explotación de las energías renovables como la energía solar y más en un país como Colombia, el cual tiene un importante potencial de aprovechamiento de la energía solar [4]. A nivel global ha habido un crecimiento en la inversión de las energías renovables, y este crecimiento fue impulsado por las inversiones en energía solar, las cuales se multiplicaron por once entre los años 2.005 y 2.008, pasando de ser una de las fuentes de energía menos competitivas a principios de la década del 2.000, la energía solar se convirtió en la más competitiva para la generación de electricidad en la mayoría de los mercados [13]–[16].

En definitiva, son múltiples las aplicaciones de la energía solar en el mundo, pero, para el caso particular de los colectores solares en los procesos industriales, las aplicaciones solares térmicas incluyen rangos de temperaturas de funcionamiento bajas ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), medias ($100\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$)

a altas ($T > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$). [17], [18]. Dependiendo de la aplicación (residencial, comercial o industrial), requerimientos de los procesos, sitio de aplicación y el ámbito económico, se debe seleccionar uno de los múltiples tipos de colectores solares que existen actualmente.

2.2 Colectores solares

Los colectores solares son dispositivos que se encargan de captar la radiación solar con el fin de aumentar la temperatura de algún fluido que así lo requiera. La radiación solar es captada por múltiples tipos de colectores solares, donde su eficiencia está determinada por la radiación incidente en la superficie del colector y la energía que es transferida al fluido que circula en el colector [19].

Los colectores solares se dividen básicamente en dos grupos, los colectores concentradores y los no concentradores, donde en estos últimos, la radiación incide directamente sobre el medio por donde se transporta el fluido de trabajo [3]. Dentro de los colectores solares no concentradores se encuentran los colectores de placa plana (Fig. 1) que están formados por una placa metálica con tubos por donde circula el fluido recubiertos para mejorar la absorción de la radiación solar, dichos colectores de placa plana tienen aplicaciones residenciales y comerciales [20], ya que las temperaturas de funcionamiento de este tipo son bajas ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) [17], [18].



Fig. 1 Colector solar no concentrador de placa plana [20]

Por otro lado, dentro del grupo de los colectores no concentradores se encuentra el colector de tubos de vacío o tubos evacuados (Fig. 2). En este tipo de colector, los tubos están inclinados y presentan un vacío entre la superficie del vidrio y la superficie del tubo con el fin de disminuir las

pérdidas de calor al ambiente [19]. La principal ventaja de estos colectores frente a los de placa plana es que pueden aumentar un 25% más la producción de energía [21].



Fig. 2. Colector solar no concentrador de tubos de vacío [21].

Asimismo, hay varios tipos de colectores solares concentradores, los cuales cuentan con un sistema de reflectores que proyectan los rayos del sol a una superficie absorbadora, haciendo que la temperatura aumente debido a la concentración de los rayos. Esto mejora también la eficiencia térmica [3], [22]. Estos se describen a continuación.

2.2.1 Colectores lineal Fresnel

Estos colectores solares consisten en una serie de espejos planos alineados, cuya orientación está organizada de tal manera que los rayos del sol se proyectan a una superficie absorbadora, la cual consta de un tubo por donde pasa el fluido que se quiere calentar [3]. Los espejos pueden ser automatizados de manera tal que se inclinan dependiendo de la ubicación del sol a lo largo del día. A continuación, en la Fig. 3. se ilustra una configuración del colector solar Lineal Fresnel con un espejo secundario y un receptor evacuado. En esta configuración, los rayos se concentran, primero, en el medio de la entrada del espejo secundario y luego se reflejan hacia el absorbedor donde se aprecia la inclinación de los espejos [23].

Estos colectores presentan un bajo costo debido a su simplicidad, principalmente el receptor estacionario y el uso de espejos casi planos a nivel del suelo. Tienen la ventaja de presentar bajas cargas de viento, menor consumo de agua en la limpieza, y no necesitan juntas rotativas (como en los colectores cilindro parabólicos), entre otros beneficios [23]–[25].

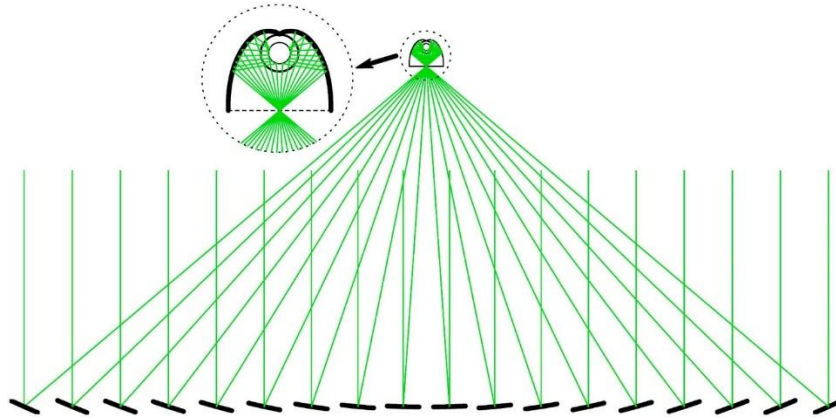


Fig. 3. Colector Linear Fresnel [23].

Sin embargo, los colectores solares Lineal Fresnel, presentan desventajas ópticas respecto a los colectores Cilindro Parabólicos, ya que se genera un efecto de sombreado, bloqueo y coseno que causan una reducción del área efectiva de cada espejo. Todo esto produce como resultado una reducción en la eficiencia para la configuración Lineal Fresnel [23], [26], [27].

En la Fig. 4a se muestran las pérdidas ópticas causadas por sombreado (cuando un espejo bloquea la radiación entrante), bloqueo (cuando un espejo bloquea la radiación reflejada) y efecto coseno (solo el área del espejo perpendicular a los rayos incidentes juega un papel en la recolección de luz solar. Y en la Fig. 4b se ilustran las pérdidas de luz solar causadas por el área vacía entre espejos.

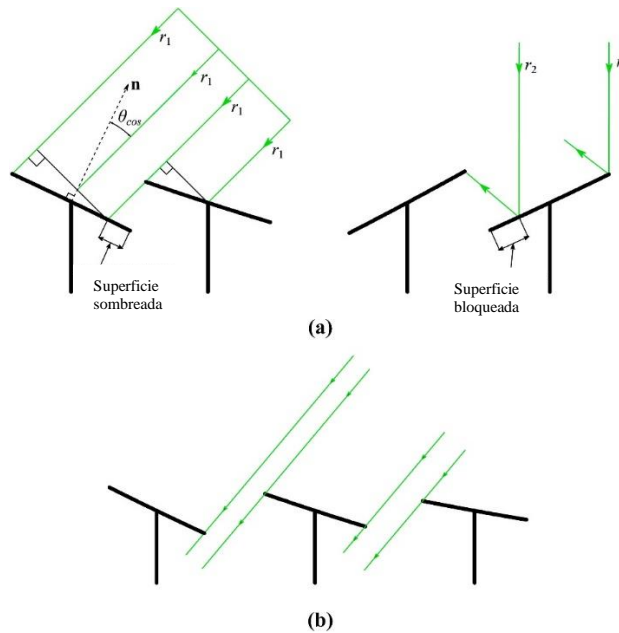


Fig. 4. Pérdidas ópticas. (a) Por sombreado, bloqueo y efecto coseno. (b) Por el área vacía entre espejos [23].

2.2.2 Colectores cilindro parabólico

El colector Cilindro Parabólico es el más utilizado a nivel mundial, gracias a su avanzada tecnología y distribución de energía. Su forma parabólica le permite reflejar los rayos desde diferentes ángulos hasta el foco, de tal modo que puede alcanzar temperaturas de hasta de 400 °C [22]. Como se muestra en la Fig. 5, la curvatura del colector se mantiene constante en la dirección axial, esto permite que la radiación solar se concentre en la región focal lineal. Además, similar al colector Lineal Fresnel, cuenta con un tubo receptor con un fluido en circulación [19]. Este colector presenta una disminución de la eficiencia extra debido a la denominada pérdida por el final del colector, ya que la radiación que incide al final del colector es reflejada fuera de la superficie del receptor, aunque al ser los colectores tan largos, esta pérdida es pequeña y no conlleva demasiada importancia [28].

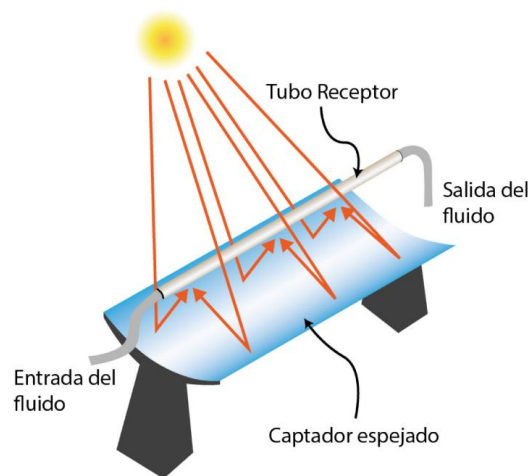


Fig. 5. Colector solar Cilindro Parabólico [28].

2.2.3 Colectores disco parabólico

A diferencia de los colectores Cilindro Parabólicos, los colectores Disco Parabólicos proyectan los rayos en un solo punto, ya que como su nombre lo indica, estos tienen forma de disco y la radiación solar se concentra en la región focal circular de menor tamaño [19]. No obstante, estos colectores se desplazan en los ejes horizontales con el fin de lograr una mejor captación de los rayos solares.

La Fig. 6 presenta un esquema básico del colector Disco Parabólico. Estos colectores no necesitan un fluido de transferencia, ya que el calor obtenido por el receptor puede ser aprovechado

directamente, ya sea para la producción de electricidad mediante un turbogenerador pequeño o para producir potencia mediante un motor Stirling [3].

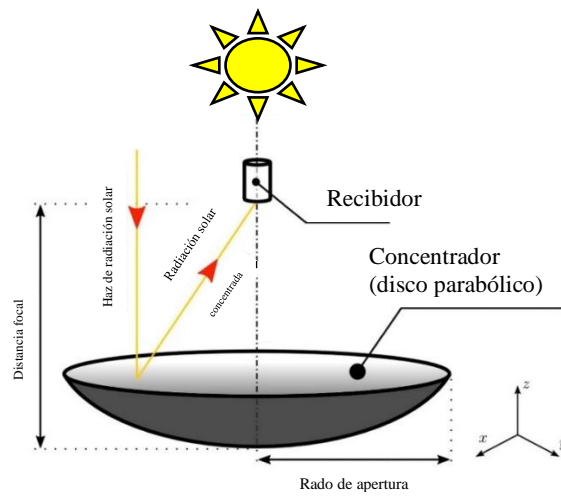


Fig. 6. Colector Disco Parabólico [22].

2.2.4 Colectores sistema torre central

También conocida como Torre Concentradora Solar o Campo Heliostático. Este sistema cuenta con superficies reflectoras cóncavas o rectas cuya orientación cambia durante el día para mejorar la incidencia de los rayos solares en el receptor el cual está ubicado en lo alto de una torre donde se encuentra el fluido a calentar [19]. A continuación, se muestra el colector Torre Central en la Fig. 7.

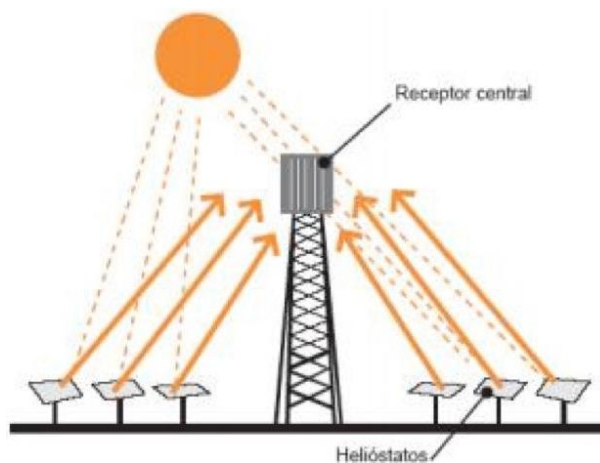


Fig. 7. Colector Torre Central [19].

Los colectores previamente mencionados son los más comunes en la actualidad; sin embargo, cada uno presenta diversas variaciones dependiendo de la aplicación, mejoras y disposiciones. Por ejemplo, se pueden presentar sistemas híbridos de paneles y colectores solares que no solo producen energía térmica sino eléctrica y al estar usando la tecnología de la recolección solar para calentar el fluido, permite que antes de que este fluido aumente su temperatura, este pueda disminuir la temperatura del panel solar y así aumentar su eficiencia [19].

Desde la Universidad Tecnológica de Pereira se han realizado análisis energético y exergético asociados a la implementación de colectores solares en el mismo ciclo de cogeneración del presente trabajo [3]. Se llegó a la conclusión que es conveniente que la implementación de los colectores solares para el ciclo de cogeneración sean de tipo Lineal Fresnel, debido a los beneficios económicos que presentan en su inversión inicial y a lo largo de su vida, a pesar de que los Cilindro Parabólicos presentan mejor eficiencia. En dicho trabajo se menciona que se ha elegido el colector NOVA-1 de la marca NOVATEC SOLAR el cual está constituido por 16 hileras de espejos que dirigen los rayos solares al tubo receptor, y cuenta con la capacidad de producir vapor saturado a unas condiciones de 70 bar y 285 ° C, garantizando un desempeño óptimo ya que elabora con alta precisión y calidad, tanto el campo colector como todos sus componentes, controlados durante el ensamble [3].

El producto NOVA-1 ganó el Premio de la Industria en la Feria de Hannover en 2.009. En 2.010 se inició la construcción de una planta de 30 MW, la primera planta de sistema de energía solar concentrada a escala de servicios públicos en el mundo basada em la tecnología Lineal Fresnel [29].

Así, este proyecto de investigación está enfocado en los colectores solares Lineal Fresnel, con el fin de analizar su impacto ambiental en el ciclo de cogeneración de referencia como complemento a las investigaciones previas realizadas por la Universidad Tecnológica de Pereira.

2.3 Planta de cogeneración

Los ciclos de generación de vapor en la industria azucarera presentan varios procesos productivos, por ejemplo, la producción de etanol, azúcar, bagazo, entre otros. Sin embargo, se suele encontrar procesos de generación de energía eléctrica ya sea para abastecer la planta misma o vender dicha energía al sistema interconectado nacional, mediante un esquema de cogeneración. La cogeneración busca aprovechar parte de la energía del vapor para calentar procesos en los ciclos.

En el libro *Termodinámica* [30] se menciona que, “la cogeneración es la producción de más de una forma útil de energía a partir de una misma fuente de energía”.

En la Fig. 8a. se muestra un ciclo de generación de vapor ideal (Rankine), donde se cuenta con una bomba la cual se encarga de alimentar la caldera con el fluido de trabajo y esta última mediante transferencia de calor, envía a la turbina el vapor a alta temperatura con el fin de generar energía eléctrica. Posteriormente, el fluido de trabajo entra al condensador y así se envía el fluido en estado líquido a la bomba para repetir el proceso.

Sin embargo, en la Fig. 8b. se puede observar que se ha implementado la cogeneración en el ciclo Rankine, donde se extrae vapor a alta temperatura para llevarlo a un proceso; por ejemplo, en el caso de estudio los procesos pueden ser elaboración de azúcar y otros productos derivados de la caña [3].

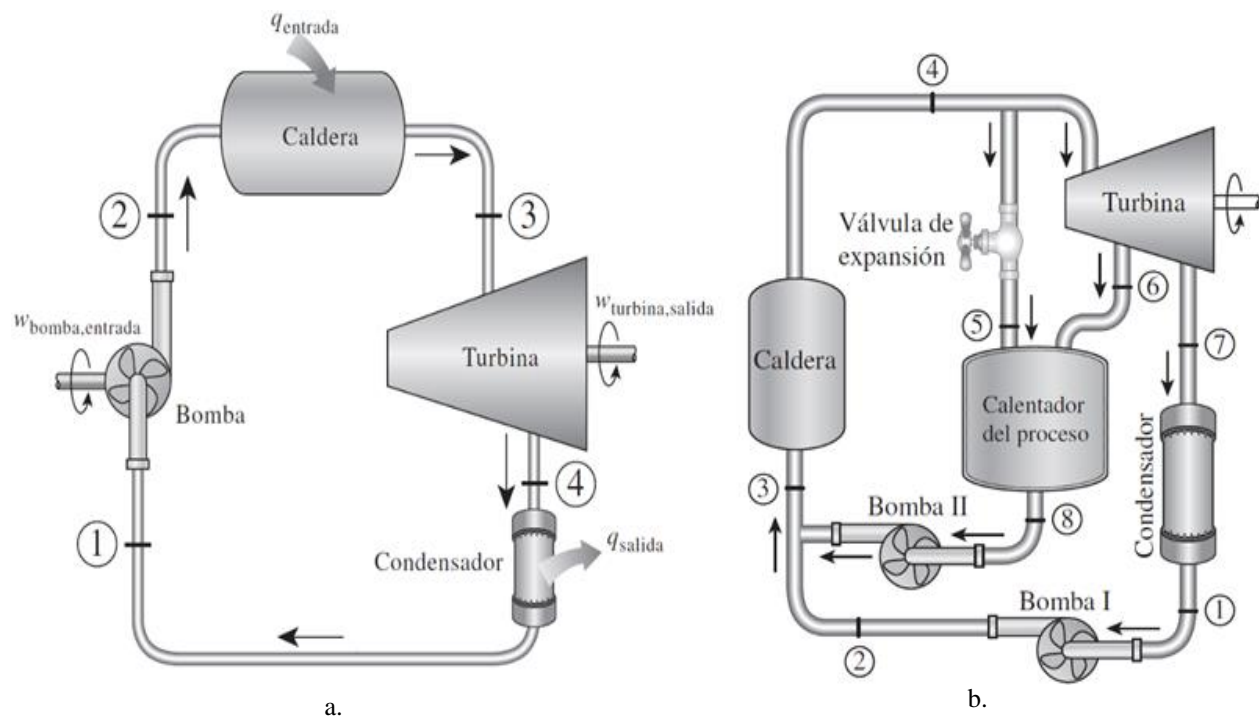


Fig. 8. Ciclo Rankine. a. Sin cogeneración. b. Con cogeneración

2.4 Planta de cogeneración objeto de estudio

En el presente inciso se pretende exponer el ciclo termodinámico de la planta de cogeneración en cuestión, y sus requerimientos de operación.

La planta de cogeneración en estudio utiliza la quema de bagazo y carbón en los generadores de vapor para la generación de vapor. Los generadores de vapor producen 35,4 kg/s de vapor, el cual es requerido por las turbinas y el proceso [3]. Se tiene también que el 10% de requerimiento energético de los generadores de vapor lo suple el carbón.

En la Fig. 9. se ilustra el ciclo de cogeneración de la planta en estudio, la cual cuenta con dos calderas para la generación de vapor. La caldera 2 produce vapor para dos turbinas de la planta, una turbina generadora para molienda (turbina-molino) con una capacidad de procesamiento de 230 toneladas de caña por hora, de las cuales el 25% se convierte en bagazo; y una turbina de contrapresión (TCP) para generación potencia y posteriormente electricidad para el consumo de la planta. Otra parte del vapor generado en la caldera 2 es utilizado directamente en el proceso. La caldera 1 genera vapor exclusivamente para un turbogenerador (Turbina de condensación - TCOND) para producción de energía eléctrica; esta turbina es la de mayor producción de potencia debido a su capacidad y eficiencia [3].

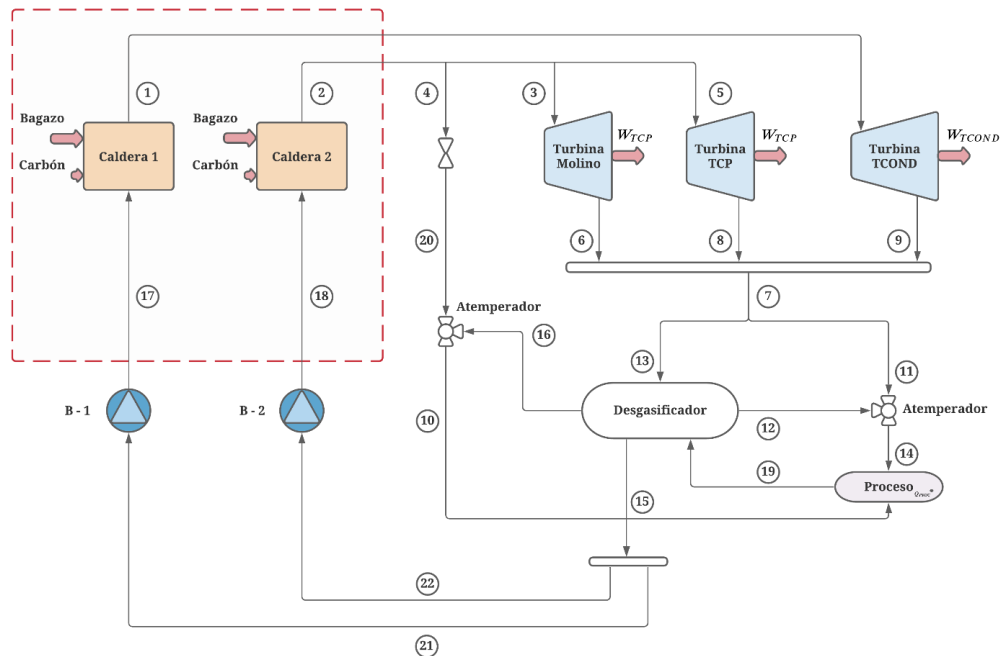


Fig. 9. Ciclo de cogeneración del sector azucarero[3].

Se puede observar que la planta cuenta con atemperadores, los cuales regulan las condiciones del vapor para el proceso. Además, se tiene un desgasificador encargado de eliminar los gases no condensables del fluido de trabajo, para ser llevado a las bombas B-1 y B-2.

La zona punteada es la zona de interés, en la cual se realizará en análisis del ciclo de vida, debido a que los colectores solares estarían actuando en los estados 17 y 18 del ciclo, es decir que los colectores solares se encargarían de precalentar el agua de alimentación antes de entrar a los generadores de vapor; esto con el fin de reducir el consumo de combustible. Así, se podrá evidenciar el impacto ambiental en los estados 1, 2, 17 y 18, antes y después del uso de los colectores.

Nota: El ahorro de combustible (8,6 %) fue proporcionado gracias al trabajo de investigación de Alejandro Escobar y Daniel Alejandro Cárdenas [3], donde se aclara que tal ahorro es calculado a condiciones de diseño, es decir, en el momento del día en que el colector alcanza su máxima eficiencia de recolección, así, dicho ahorro podría verse afectado por cambios meteorológicos que impidan una eficiente recolección de energía proveniente del sol.

2.5 Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (*LCA*) es una herramienta utilizada para evaluar ambientalmente un proceso, producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida [5]. Es un proceso de etapas el cual proporciona herramientas para tomar decisiones frente a los productos, procesos o servicios. Lo que busca el LCA es identificar, cuantificar y caracterizar los impactos potenciales a cada una de las etapas del ciclo de vida del producto o proceso (desde la cuna hasta la tumba) [5].

El LCA es la única metodología de valoración de externalidades ambientales que cuenta con lineamientos expedidos por la Organización Internacional de Estandarización (ISO). La primera serie de lineamientos para esta metodología fue creada en 1.997, pero en 2.006, ISO reorganizó los contenidos y creó la serie 14040 [31].

Dicho análisis pretende responder cuestionamientos hacia el proceso como, ¿Qué cantidad de recursos primarios consume?, ¿Cuánta energía consume?, ¿Qué emisiones y vertidos generan al ambiente? ¿Cuáles son los impactos ocasionados?

En síntesis, el LCA recoge la información que se presenta de forma esquemática en la Fig. 10. El LCA para la planta de estudio se realizará en el siguiente capítulo.

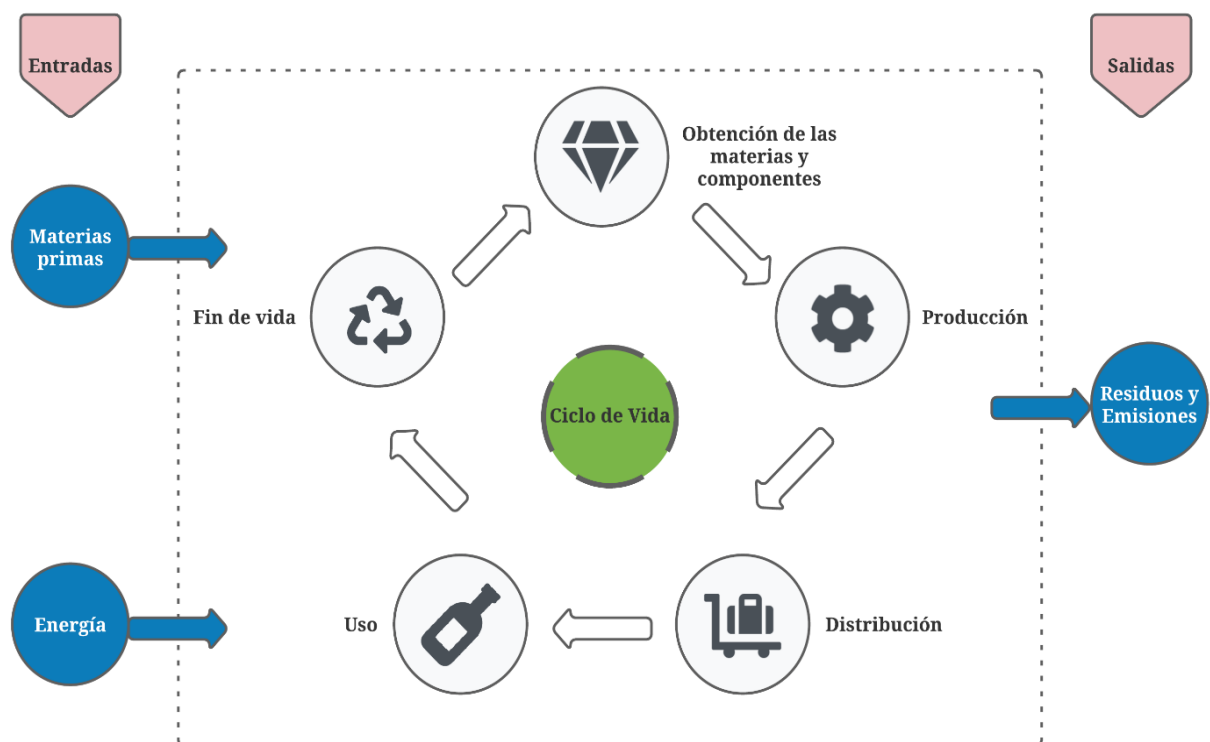


Fig. 10. Descripción del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) [5].

3 MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se presenta el marco metodológico empleado para implementar el análisis de ciclo de vida del uso de colectores solares en el ciclo de cogeneración de referencia.

El Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment* – LCA), es una técnica empleada en la evaluación de aspectos que se relacionan con el desarrollo de un producto o sistema. Es también una herramienta usada para evaluar el impacto potencial a lo largo de la vida de un producto (de la cuna a la tumba) desde su adquisición, procesamiento, fabricación, uso de materia prima y finalmente su eliminación [5], [32].

Para realizar un LCA y así, determinar el impacto ambiental asociado al uso de colectores solares en un ciclo de cogeneración en la industria azucarera, es necesario seguir los lineamientos dados por la norma ISO 14040 [5], donde las principales actividades a realizar son:

- i) Definición del alcance del Análisis del Ciclo de Vida,
- ii) Elaboración del análisis de inventario,
- iii) Evaluación del impacto ambiental, y
- iv) La interpretación del LCA.

El alcance de un LCA, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y el uso previsto de estudio. Para esta etapa, el proyecto se basará en diversas investigaciones realizadas en la Universidad Tecnológica de Pereira sobre plantas de cogeneración en la misma zona tropical de Latinoamérica, con el fin de extraer la información necesaria para el LCA [3], [5], [11], [33].

La fase de análisis de inventario (*Life Cycle Inventory* – LCI) es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recolección de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido. [5].

La evaluación del impacto ambiental (*Life Cycle Impact Assessment* – LCIA) es la tercera fase del LCA cuyo objetivo es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del

inventario del ciclo de vida (LCI) del sistema en estudio, es decir los colectores solares y los procesos asociados en la planta de cogeneración de referencia [5].

La fase final del LCA es la interpretación del análisis, en el cual se resumen y discuten los resultados del LCI o del LCIA o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance previamente definidos para exponer el impacto ambiental al implementar los colectores solares en la planta de cogeneración [5].

Se debe aclarar que hay casos en los cuales el objetivo de un LCA se puede satisfacer desarrollando únicamente un análisis de inventario y una interpretación. Generalmente se hace referencia a esto como un estudio de LCI [5].

En síntesis, se tiene la metodología del proyecto en la Tabla 1:

Tabla 1. Marco metodológico del proyecto.

Objetivo	Metodología
Seleccionar indicadores de desempeño ambiental necesarios para evaluar el impacto ambiental asociado a la operación del ciclo de cogeneración objeto de estudio.	Revisión bibliográfica para seleccionar los indicadores de desempeño ambiental requeridos en el proyecto. Definición del alcance y unidad funcional del LCA.
Identificar y recopilar las entradas y salidas que generen impactos ambientales al usar colectores solares en un ciclo de cogeneración en la industria azucarera.	Extracción de los datos sobre los procesos del ciclo donde se genere impacto al implementar colectores solares. Elaboración del Inventario de Ciclo de Vida de estos procesos.
Realizar un análisis de ciclo de vida del ciclo de cogeneración usando colectores solares, según la norma ISO 14040.	Evaluación de impacto ambiental según los indicadores relacionados de los procesos del ciclo en cuestión, mediante un software de LCA.
Analizar los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida y así determinar el impacto ambiental de los colectores solares y su influencia sobre el desempeño ambiental del ciclo de cogeneración.	Análisis de los datos obtenidos y determinar el impacto ambiental del uso de los colectores solares en el ciclo. Comparación de los impactos de la planta con y sin colectores, conclusiones y recomendaciones.

3.1 Análisis de ciclo de vida para la planta de estudio

En esta sección, se pretende desarrollar a profundidad cada etapa del LCA para la planta en estudio, es decir que se presentará la definición del alcance del LCA, la elaboración del análisis de inventario, la evaluación del impacto ambiental, y la interpretación de los resultados para los procesos y/o sistemas necesarios.

Con base en lo anterior y siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14040 [5], se establece el alcance del LCA:

3.1.1 Definición del alcance del análisis del ciclo de vida

El ciclo de cogeneración objeto de estudio es una planta de la industria azucarera ubicada en Colombia, como se presentó anteriormente en la Fig. 9. El ciclo consta, principalmente de 22 estados termodinámicos. El alcance del LCA son las fronteras del proceso o sistema, en este caso el ciclo de cogeneración. No obstante, el sistema de interés en el ciclo, debido a los impactos ambientales, está comprendido entre los estados termodinámicos 17, 18, 1 y 2, entre los cuales se presenta la transferencia de calor para la generación de vapor por la quema de combustible que, como se ha mencionado anteriormente, la mayor parte es bagazo. Normalmente, el proceso de combustión de este recurso está acompañado de la quema de un 10% a un 15% de carbón.

En resumen, se establece que, del total de energía requerida por los generadores de vapor, el 10% se logra mediante la combustión del carbón y el 90% con el bagazo. Así, una vez delimitado el sistema, se establece la unidad funcional del problema: 1 tonelada de vapor de agua. Es decir, que este es el elemento base para determinar el impacto ambiental asociado al uso de los colectores solares. Al tratarse de bagazo y carbón, las afectaciones más importantes son la huella de carbono asociada a cada tonelada de vapor generado y la acidificación del medio ambiente debido al contenido de azufre del carbón.

Al delimitar sistema y definir el alcance del LCA como se muestra en la Fig. 10, se puede observar que el problema ambiental se reduce a los impactos asociados a la combustión, los cuales se podrían reducir integrando un sistema de colectores solares (Figs. 11a. y b.).

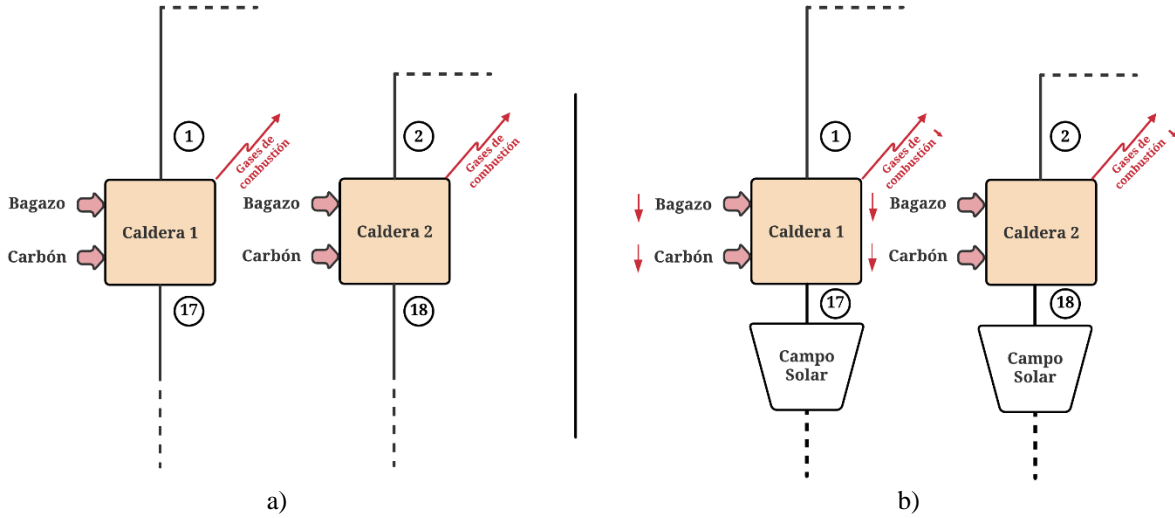


Fig. 11. Alcance del LCA. a. sin colectores, b. con colectores.

Según la ISO 14040, los procesos y sistemas deben ser analizados desde “la cuna hasta la tumba” [5]. Es decir, desde la obtención de sus materias primas para su fabricación, su manufactura, transporte y operación hasta el desmantelamiento y su disposición final. Por lo anterior es importante destacar que el LCA podría ser efectuado a toda la planta; sin embargo, la planta como tal físicamente no presentará modificaciones, solo se implementarán los colectores. El impacto ambiental asociado a los equipos desde la cuna a la tumba es el mismo para la planta antes y después de implementar los colectores. Además, el número de máquinas en el ingenio es considerablemente elevado, lo cual aumentaría la incertidumbre al momento de realizar el análisis. Todo esto es poco práctico y es la razón principal por la que se debe delimitar el alcance del análisis.

Por lo anterior, el LCA es una superposición de los análisis de cada conjunto de procesos y máquinas en sus diferentes etapas de vida útil. Así, para la delimitación del alcance se la ecuación (1):

$$LCA_{Total} = LCA_{C1} + LCA_{C2} + LCA_{Col} \quad (1)$$

Donde LCA_{C1} , LCA_{C2} y LCA_{Col} son los análisis asociados a los generadores de vapor 1 y 2 y a los colectores respectivamente, los LCA de estos dispositivos consisten en la evaluación “desde la cuna hasta la tumba” de cada uno. Se analizan, según la norma, los impactos ambientales asociados a los materiales, y la manufactura de los equipos; también se analizan los impactos relacionados

con la operación de los generadores de vapor y colectores; y se hace un análisis para los impactos asociados con la disposición final de los dispositivos.

El impacto ambiental del uso de combustibles está asociado a la huella de carbono. A nivel global, cada vez que se implementan tecnologías que mejoran la calidad del medio ambiente mediante la reducción de combustibles, se da suele dar respuesta a cuánto CO₂ se dejó de emitir producto de dichas mejoras [34]. De manera que se establece la huella de carbono como el principal indicador ambiental del proyecto. Asimismo, el alcance del Análisis de Ciclo de Vida y la unidad funcional (1 tonelada de vapor de agua), usada con el fin de establecer una referencia para la normalización de los datos de entrada y salida asociados a la producción de carbón energético y el bagazo para la generación de vapor de la planta.

Asimismo, para este proyecto, los casos considerados fueron: i) el caso base, donde se adaptaron los inventarios para producir 1 kg de bagazo y 1 kg de carbón; ii) el caso de la cogeneración de la planta en estudio donde la unidad funcional es una tonelada de vapor de agua; y iii) el caso de cogeneración al implementar colectores solares tipo Lineal Fresnel, para el que la unidad funcional de igual forma es una tonelada de vapor de agua.

3.1.2 Elaboración del análisis de inventario para el bagazo

La fase de análisis de inventario (*Life Cycle Inventory* – LCI) es una recopilación de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recolección de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido [5].

Esta parte del LCA es la más importante. Se realiza una recopilación de datos relevantes para el proceso; sin embargo, según la ISO 14040 [5], debe ser un proceso iterativo, ya que es un procedimiento que debe perfeccionarse progresivamente. Así, como se mencionó en el numeral anterior, se deben determinar los flujos de entrada y salida de masa y energía, así como los productos, desechos y/o liberaciones a la atmósfera, agua y suelo y se sigue con la correlación de los datos con los procesos y la unidad funcional [35].

Según estudios publicados por Imperial College London en el Reino Unido [36], la disponibilidad de datos es una preocupación al realizar un LCA y, como la mayoría de los datos de alta calidad necesarios para este paso es confidencial para las empresas; hay poca información disponible para

el público en un formato adecuado para la LCA [35]. Esta es la razón por la que gran parte de la información requerida por este paso es extraída de fuentes bibliográficas publicadas e información ya recolectada por estudios previos para el caso de estudio. En la Fig. 12 se muestra un diagrama de flujo que explica la iteración requerida para obtener el inventario.

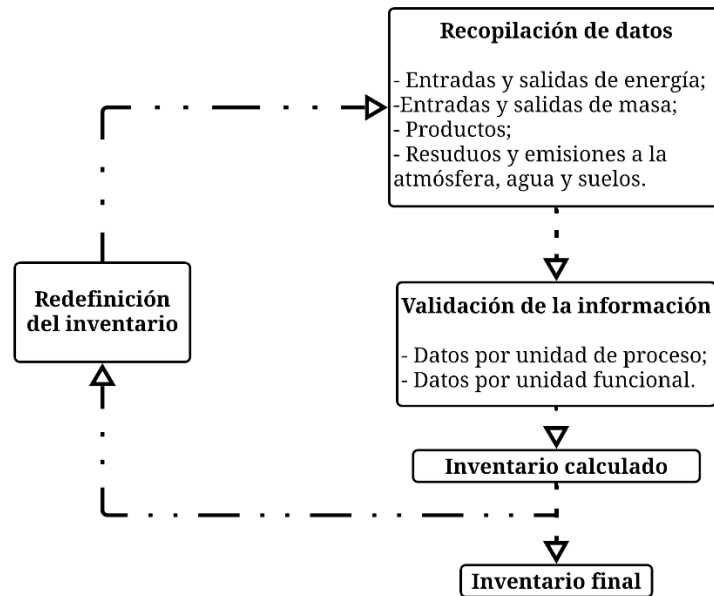


Fig. 12. Iteración del Inventario de Ciclo de Vida [35].

Según la Fig. 11. la huella de carbono asociada a la operación de los dispositivos está también en función del ciclo de vida del bagazo y el carbón. Así, para el alcance del análisis planteado y según la norma, se debe realizar un inventario para cada proceso que interfiera en los límites del sistema. Es decir, que, para hallar la huella de carbono total, se debe que determinar la huella de carbono asociada a la producción de bagazo, la producción de carbón, y la quema de estos combustibles. En suma, se deben determinar las entradas y salidas del proceso de producción de bagazo, al igual que la del carbón.

Se debe realizar un inventario de ciclo de vida para la producción de bagazo y carbón requeridos, es decir, expresar las entradas y salidas de combustible, energía, recursos, etc. para obtener el producto terminado de bagazo y carbón, que posteriormente serán empleados para generar 1 t_{vap} .

La Fig. 13 muestra el proceso productivo asociado a la caña de azúcar para la obtención del bagazo.



Fig. 13. Proceso productivo del bagazo [37].

En este proceso productivo se cuenta con la etapa de preparación de la caña, al que se le anexará la información relacionada con la siembra de caña, como lo es el proceso de campo y de cosecha. La etapa de molienda describe todo el proceso de fábrica asociado a la caña de azúcar, el cual se divide en la extracción del bagazo y productos como compostaje, azúcar y alcohol carburante, donde estos tres últimos no son de interés en el proyecto, ya que el análisis está delimitado hasta la obtención del bagazo para la generación de vapor y electricidad.

En definitiva, se tiene en la Fig. 14 las entradas y salidas para el proceso de preparación de la caña el cual está dividido en el proceso de campo y el proceso de cosecha y la etapa molienda.

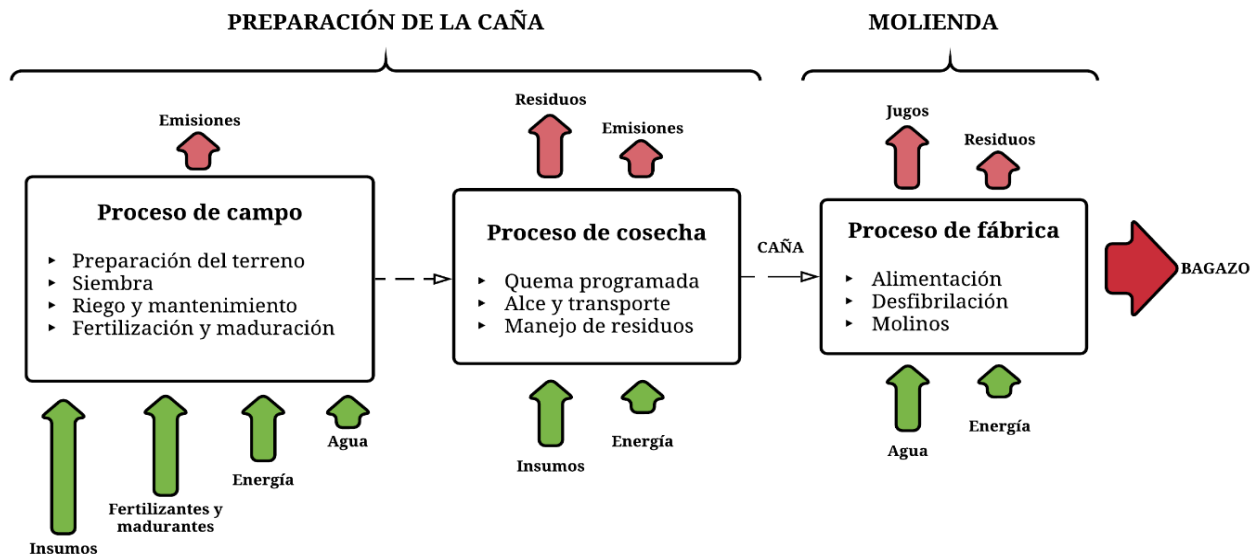


Fig. 14. Diagrama de flujo de entradas y salidas para la obtención de bagazo.

Con base en información publicada por el ingenio de referencia y proyectos llevados a cabo en dicha empresa [37], [38], se describe a continuación el proceso de cada etapa:

i) Proceso de campo:

Es el proceso relacionado con el terreno, la siembra, el riego, la fertilización y la maduración. Todo esto ocurre antes de la etapa de cosecha.

Antes de establecer un nuevo cultivo de caña de azúcar, se deben realizar obras de adecuación del terreno y labores de preparación de suelo, definidas de acuerdo con levantamientos topográficos previos, y estudios hidrológicos y agrológicos, principalmente. Se tratará a continuación las etapas más importantes del proceso de campo.

- a) *Preparación del terreno*: consiste en una secuencia de labranza reducida que incluye las labores mecánicas de destrucción de cepas, desterronada, pulida y surcada del terreno. Se utiliza para la renovación de plantaciones de caña en lotes que no requieren ser adecuados nuevamente.

Se tiene la Tabla 2 que describe las herramientas utilizadas para la preparación del terreno y su consumo.

Tabla 2. Inventario, herramientas y equipos para labranza del terreno.[38].

Labor	Equipo	Característica	Consumo total [gal]	Consumo total por hectárea [gal/ha]
Destrucción de cepas	Rastras pesadas	18 discos x 36"	20.000	1,4
Desterronada y pulida	Rastras livianas	48 discos x 24"	10.000	0,72
Surcada del terreno	Surcadora	De 3 cuerpos	3.000	0,21
Total consumo			33.000	2,33

- b) *Siembra*: Cuando se han conformado los surcos, se procede con la siembra. Gran parte de la labor es llevada a cabo a mano por los cañicultores (descarga de lote de semillas, acomodo de la semilla y su tapada). Los consumos relacionados a esta labor se presentarán de manera general en la Tabla 7.
- c) *Riego*: Mediante esta labor se busca suministrar al cultivo el volumen de agua necesario en el momento oportuno, para lograr un buen desarrollo de las plantas y alta productividad. El riego se encuentra a cargo del ingenio y de empresas externas. Así, el ingenio se encarga

de irrigar un área de 5.296,95 ha y las empresas externas un área de 2.174,30 ha. Adicionalmente, las fuentes de agua para riego son de ríos, lagos y pozos [38].

El riego se hace por aspersión o por gravedad y los equipos utilizados para esta labor se muestran en la Tabla 3.

El consumo de combustible para esta labor se presenta de manera general en la Tabla 7.

~~d)~~ *Mantenimiento del terreno (orilleras, canales de riego y drenaje)*: Por medio de esta labor se limpia y/o rectifica las orilleras y los canales, con el fin de adecuarlos para una mejor conducción y evacuación del agua. Se consumen aproximadamente 3.000 gal de combustible en mantenimiento del terreno.

~~e)~~ d)

Tabla 3. Equipos requeridos para riego. [37]

Equipo	Característica	Potencia (HP)	Cantidad de agua promedio aplicada por riego [m ³ /riego ha]
Tractor riego por aspersión	Transportador con remolque para motobomba, tubería (L<1 km) y accesorios	100 – 120	645,41
Tractor riego por gravedad	Transportador con remolque para, tubería y accesorios	80	976,56

~~f)~~ *Fertilización y control de malezas*: A través de esta labor se deposita e incorpora el fertilizante en la zona radicular para mejorar las condiciones físicas del suelo. Esta labor se realiza entre los 45 y 75 días después de la siembra [38]. Además, se controla las malezas (arvenses) para evitar que “compitan” por luz, espacio, nutrientes, y agua con el cultivo de caña. La aplicación de los herbicidas se realiza de manera manual y lo hacen empresas externas. El volumen de la mezcla de cada uno de los fertilizantes usados es de 150 l/ha. La Tabla 4 presenta los herbicidas utilizados.

Tabla 4. Inventario de herbicida y fertilizantes [38].

Herbicida	Dosis [kg ingrediente activo / ha]	Masa total [kg]	Dosis por área cosechada [kg/ha]
Ametrina	2	13.713,36	0,98
Diuron	2,5	16.623,95	1,20
Acido 2-4D	1,5	16.090,37	1,16
Glifosato	2,5	10.100,15	0,73
Fertilizante	Dosis [kg ingrediente activo / ha]	Masa total [kg]	Dosis por área cosechada [kg/ha]
Carbonato de calcio	1.291,47	32.700,02	2,36
Urea al 46%	208,35	75.549,79	5,45

g) **Maduración:** A través de esta labor se busca obtener la máxima recuperación posible de azúcar, estabilizar el contenido de azúcar, obtener una ganancia adicional en un periodo de tiempo corto, sin deteriorar el cultivo; y reducir la duración del periodo vegetativo entre cosechas. Según el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia – CENICAÑA, en la zona de estudio el madurante conocido más usado se tiene el nombre comercial de RoundUp y es el más utilizado ya que tiene muy buenos resultados en términos de efectividad, persistencia de su actividad y economía. El integrante activo de dicho madurante es el Glifosato N (Fosfonometil) Glicina, y se aplican entre 0,75 y 1,5 l/ha del producto comercial. Se dice que dicho compuesto no es volátil y no produce vapores que puedan afectar plantas próximas [38], [39]. Se requiere de una avioneta o equipo liviano para la aspersión del madurante.

La Tabla 5 resume la cantidad de madurador aplicado por hectárea (dosis de 4,2 l/ha), y la Tabla 6 la aplicación de los maduradores y su consumo de combustible por año.

Tabla 5. Cantidad de madurador aplicado por área [38].

Madurador	Área madurada [ha]	Ing Activo total [kg]
Glifosato	4.849,59	3.511,1032
Fusilade	4.927,93	5.420,7230

Bonus (Moddus®)	2.106,05	2.106,0500
-----------------	----------	------------

Tabla 6. Consumo de combustible para la aplicación de los maduradores [37].

	Avión liviano	Gal / ha cosechada
Área de caña madurada [ha]	11.883,57	
Capacidad tanque aeronave	132	
Tipo de combustible	Gasolina corriente	
Consumo de combustible por año [gal/año]	2.150,58	0,1552

Adicionalmente se tiene el inventario del consumo de combustible por transporte en las labores de campo en la Tabla 7.

ii) Proceso de cosecha:

El proceso de cosecha es una de las operaciones más importantes, ya que es necesaria una adecuada organización, debido a que se requiere llevar a las fábricas de azúcar la cantidad de caña necesaria para cumplir la demanda de molienda y producción de manera oportuna y de alta calidad [40].

Tabla 7. Consumo de combustible por transporte en labores de campo. [38].

Actividad	Consumo de combustible [gal/año]
Transporte de equipos para labores de campo hasta los cultivos	735,23
Transporte de personal al campo	14.691,6
Transporte de herbicida hasta el campo	867,8
Transporte de insumos hasta el campo	6.332,97
Aplicación de maduradores	2.150,58
Otros (Labores no programadas de campo)	808,8
Consumo de combustible total en labores de campo	25.586,98

iii) Proceso de cosecha:

En entrevistas con el personal del ingenio en estudio, se ha especificado que la caña recién cosechada y lista para procesarse, viene con materia extraña. Se han encontrado objetos metálicos, plásticos y basura en ocasiones. Por esta razón es importante una buena organización de la

operación de cosecha, además que no solo vienen objetos extraños sino materia proveniente del cultivo como son los cogollos, hojas verdes, hojas secas, raíces y tierra. El ingenio debe ser riguroso en este proceso ya que la calidad del azúcar y demás productos será proporcional a la cantidad de materia y objetos extraños en la carga de caña [38].

Dentro del proceso de cosecha de caña se encuentra las actividades de quema programada, los sistemas de cosecha con su alce y transporte, y el manejo de los residuos de la cosecha. Estos se ven detalladamente a continuación. De estas labores se tiene que la cosecha es realizada por empresas externas, y el área total cosechada es de 13.853,71 ha; el consumo de combustible por transporte es de 17.075,69 gal/año. La caña molida es de 1538.067,977 ton, y el rendimiento de la caña calculado es de 111,0221 ton/ha. La edad promedio de la caña cosechada es de 13,26 meses.

- a) *Quema programada:* Es una práctica utilizada por el ingenio para facilitar el corte de la caña y eliminar malezas. Consiste en dejar caer gotas de combustible encendido sobre los cultivos por medio de quemadores manuales o quemadores de tractor o lanza – llamas los cuales utilizan diésel para generar llama [38].
- b) *Sistemas de cosecha, alce y transporte:* Existen varios sistemas para cosecha de la caña de azúcar, cada ingenio tiene un departamento encargado para coordinar esta labor [38], [39]. La cosecha se puede hacer de manera manual. Es dispendiosa, sin embargo, permite cortar los tallos a ras del suelo y permite una colocación ordenada de los tallos en el suelo para el alce mecánico.
También se puede realizar de manera mecanizada. Esta se puede realizar para caña verde o caña quemada. La cosechadora entrega la caña directamente a vagones, que la reciben picada para transportarla a fábrica.
- c) *Manejo de residuos de la cosecha:* Por medio de esta actividad se busca despejar la cepa y acomodar los residuos de cosecha (hojas, tallos y cogollos) en las calles o entresurcos. Los objetos metálicos que logren permanecer serán filtrados mediante un electroimán en la etapa de fábrica.

En la Tabla 8. Se presenta de manera general los equipos utilizados para el proceso de cosecha de caña y su consumo de combustible.

Tabla 8. Inventario labores de cosecha [38].

Equipo	Consumo de combustible total de equipos por año [gal/año]	Número de equipos en labores de cosecha	Horas laboradas por año [h/año]
Tractor Case 9230	85.733,9	6	32.974,58
Tractor Case IH STX275 4WD	26.379,66	3	6.594,92
Tractor 85 ATX	39.965,88	4	15.371,49
Otros tractores	19.784,75	4	7.609,52
Cosechadoras	130.265,97	8	14.314,94
Alzadoras	67.967,49	10	17.427,56
Tractomulas en transporte de caña	307.061,04	23	90.312,07
Total Consumo	677.158,69		

iv) Proceso de fábrica:

Es el proceso realizado por el ingenio para obtener el azúcar, alcohol carburante, compostaje, y el bagazo. Cuenta con varias etapas, que son: alimentación, desfibrilación, molinos, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación y secado [37]. Por el alcance establecido en el proyecto, las etapas de clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación y secado no se contemplarán debido que el objeto de interés es la producción del bagazo, el cual se obtiene después de que la caña de azúcar haya finalizado la etapa de molinos. Por entrevistas realizadas al ingenio, se presenta a continuación una descripción del proceso de fábrica hasta la etapa final de molinos.

Cuando la caña es cosechada y enviada al ingenio por los tractores cañeros, esta se recibe en unos patios donde se da ingreso de la carga al ingenio. La caña es recibida por 3 mesas de caña, donde la mesa de caña N° 2 está fuera de servicio por averías para el año 2.020.

Las mesas de caña cuentan con una banda transportadora que envía la carga a un conductor de caña, que a su vez, este envía la carga a un tambor nivelador, el cual se encarga de que cada caña se oriente en la misma posición.

Posteriormente, la caña nivelada se envía al tambor alimentador. Este se encarga de “prensar” la caña y que quede compacta para ser enviada al desfibrilador pesado de alimentación horizontal; el cual es una máquina que consta de varios martillos que muelen la caña. Una vez superada la etapa de desfibrilación, la carga es recibida por la pateadora que se encarga de enviar la caña a un electroimán ubicado a 18 pulgadas de la caña, con el fin de filtrar los posibles objetos metálicos que estén presentes en la carga. Luego, la carga pasa por el chute de alimentación para finalmente ser enviada a los molinos. La extracción de los jugos de la caña (sacarosa) se da en la etapa de molinos utilizando la presión ejercida por los rodillos dentados; esta etapa de molienda consta de 6 molinos. El jugo extraído en cada molino es recirculado al anterior, y a este proceso se le conoce como maceración. Así, se retroalimenta el producto para extraer la máxima cantidad posible de sacarosa.

Los jugos extraídos por cada molino son recibidos al inferior de estos mediante unas cavidades llamadas platos. Los platos están conectados a unas bombas que envían el líquido a los intermedios para hidratar la carga en el siguiente molino. Normalmente, los jugos al llegar al intermedio están a una temperatura entre 75 °C y 80 °C.

En el molino 6 se obtiene el bagazo (primer subproducto del proceso) el cual no es posible extraerle más sacarosa en el ingenio, estos restos de caña son llevados como combustible al área de cogeneración. Los jugos al final son almacenados en unos tanques de almacenamiento. Posteriormente, este jugo es el que es enviado a los laboratorios para elaboración.

Con el fin de sintetizar la información obtenida de la producción de bagazo, se tiene la Tabla 12, donde se ilustran los consumos de combustible e insumos (sin fertilizantes, madurantes y químicos, estos harán parte del inventario final) de los procesos de campo, cosecha y fábrica. Se aclara que como el ingenio en cuestión produce su propia energía, esta no se incluye en la Tabla 11. Posteriormente, estos datos se utilizarán para construir el inventario de ciclo de vida del bagazo.

De la Tabla 10 se obtiene el consumo de diésel, gasolina corriente y agua total para la producción de 1538.067,97 t de caña de azúcar y 360.196,3 t de bagazo.

Tabla 9. Información preliminar del Inventario de Ciclo de Vida

Proceso	Tipo de insumo	Valor*	Unidad
Proceso de Campo			
Labores de campo (Tabla 7)	Gasolina corriente	25.586,98	gal
Maduración	Gasolina corriente	2.150,58	gal
Preparación del terreno	diésel	33.000	gal
Mantenimiento del terreno	diésel	3.000	gal
Fertilización	diésel	33.738,2	gal
Riego	Agua de pozo/río	4063.141	m ³
Siembra	Paquetes de semillas	8196.921,36	
Proceso de Cosecha			
Labores de cosecha (Tabla 8)	diésel	677.158,69	gal
Transporte	Gasolina corriente	17.075,69	gal
Proceso de Fábrica			
Imbibición	Agua	876.000	m ³

*Información para una cosecha de caña de 1538.067,97 t y una producción de bagazo de 360.196,3 t.

Adicionalmente, se sustraen los insumos que no comprometen en un alto impacto la huella de carbono, como son los paquetes de semillas. El total se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Consumo total de combustible y agua de los procesos de la caña de azúcar

Consumo por proceso	*Valor	Unidad
Proceso de Campo		
Total diésel	69.738,2	gal
Total gasolina corriente	27.737,56	gal
Total agua	4063.141	m ³
Proceso de Cosecha		
Total diésel	677.158,69	gal
Total gasolina corriente	17.075,69	gal
Proceso de Fábrica		
Total agua	876.000	m ³
Total diésel	746.896,89	gal
Total gasolina corriente	44.813,25	gal
Total agua	4939.141	m³

*Información para una cosecha de caña de 1538.067,97 toneladas y una producción de bagazo de 360.196,3 toneladas.

Estandarizando la información obtenida del consumo total de combustible, agua, fertilizantes, abono, químicos y madurantes, se tiene el inventario de ciclo de vida para el bagazo. Es decir, las entradas y salidas de energías, insumos, etc. necesarios para producir la unidad funcional. Ver ANEXOS. Adicionalmente, se tiene la composición de bagazo obtenido en la planta. Tabla 11.

Tabla 11. Propiedades químicas del bagazo. [3]

Análisis próximo	(%)
Material Volátil (MV)	11.22
Ceniza (Cz)	6
Análisis último	(%)
C	20
H	3
N	1
O	20
S	0
H ₂ O	50
PCS (kJ/kg)	7.489
PCI (kJ/kg)	5.610

3.1.3 Elaboración del análisis de inventario para el carbón

Como se ha mencionado anteriormente, se debe realizar un análisis similar para el carbón. De esta manera se realizará una descripción de los procesos necesarios para obtener el carbón requerido para generar una tonelada de vapor (16,158 kg_{car}).

El caso del bagazo cuenta con datos robustos para el inventario debido a que el ingenio mismo es el que procesa todas las etapas de la caña hasta obtener el bagazo. De esta manera se pudo obtener con precisión mediante proyectos y entrevistas, los datos presentados. Sin embargo, en el caso del carbón, este combustible se adquiere en empresas externas; y los insumos necesarios para establecer el inventario de ciclo de vida del carbón no están a primera mano.

Para el ingenio en estudio, son dos los lugares donde se compra el carbón: en las reservas de Cundinamarca y Valle del Cauca. No obstante, la información relacionada con la producción de carbón de las empresas que lo venden al ingenio es poca o nula. Por medio de la referenciación

bibliográfica, se revisan procesos de minería similares a los usados por las empresas a las que el ingenio compra el carbón (minería subterránea).

Estudios realizados en una mina en Brasil [35], ilustran procesos de extracción de carbón similares a los de Colombia. Adicionalmente, la UPME [41], describe las principales etapas de la cadena de carbón, las cuales serían: *exploración, explotación, beneficio, transformación, transporte y comercialización* (Fig. 15).

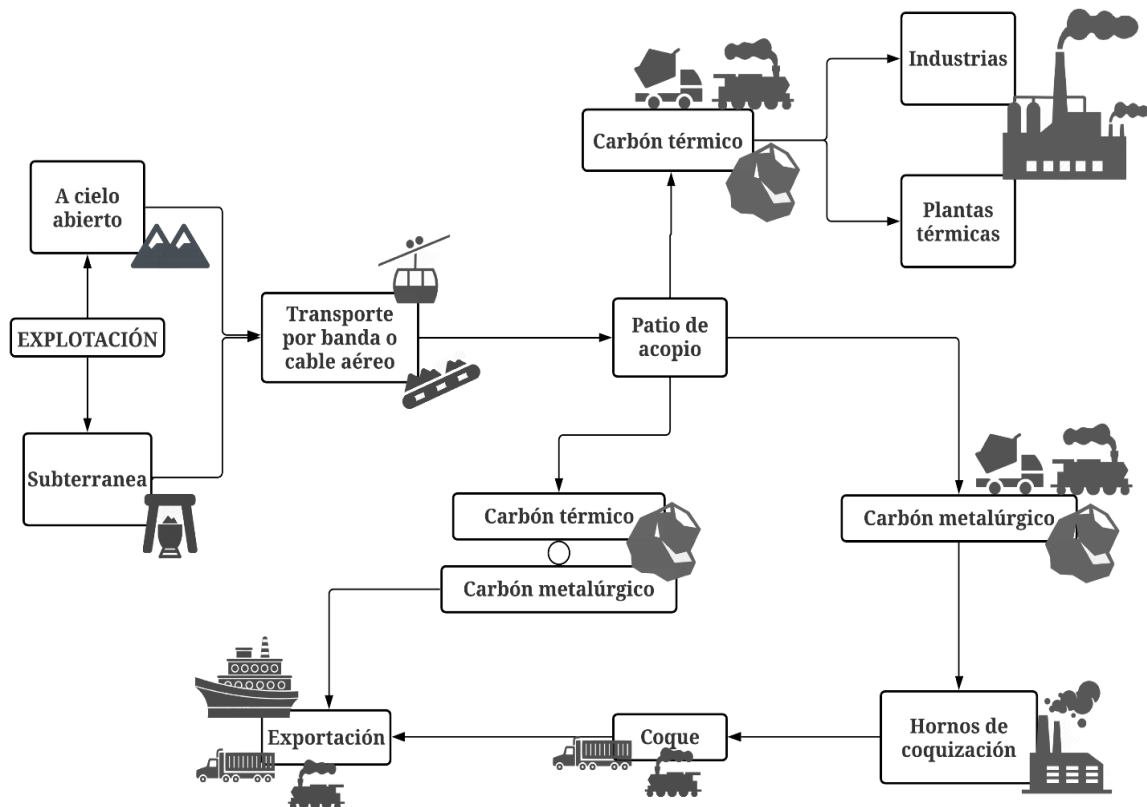


Fig. 15. Cadena del carbón en Colombia [41].

Al igual que el procedimiento realizado para la caña de azúcar en la obtención del bagazo, se debe realizar una delimitación en los procesos para obtener carbón, donde se pondera las etapas del proceso productivo dependiendo de su nivel impacto ambiental asociado.

Así como para el bagazo, no se consideró la obtención, alquiler, y nivelación de los predios para el cultivo de caña, para el carbón se omite la etapa de exploración, ya que el análisis se hace sobre terreno ya adquirido y en explotación. Tampoco se considera la etapa de comercialización, debido a que los impactos ambientales relacionados a estos procesos son significativamente bajos y abstractos en comparación con los procesos restantes. Los procesos resultantes son:

i) Explotación y producción:

Es la etapa que se subdivide en desarrollo, montaje (vías de acceso, obras de infraestructura, servicios a la mina), preparación (delimitación de áreas dentro del yacimiento, bancos, niveles, subniveles, tambores, entre otros) y finaliza con el arranque, extracción o producción en mina, por diferentes métodos y sistemas de explotación, según las condiciones del yacimiento carbonífero [41].

ii) Beneficio:

Es el conjunto de actividades y operaciones necesarias para el mejoramiento de las condiciones físicas del carbón que permitan adecuarlo a determinados usos y un mejor transporte. Por lo general incluye las siguientes etapas [41]:

- Separación: división de carbones con cualidades diferentes dispuestos en mantos o vetas contiguas, por lo general se hace dentro de la mina.
- Selección o clasificación manual: sustracción manual de rocas adyacentes, intercalaciones al manto o impurezas que puedan acompañar el carbón al ser extraído de la mina.
- Trituración y quebrantamiento: reducción de las dimensiones de los fragmentos de carbón extraído como parte de una clasificación por tamaño que además es útil para su transporte
- Tamizado o clasificación por tamaño: clasificación del material mediante mallas que controlan el paso del material según el tamaño.
- Lavado: disminución del porcentaje de cenizas e impurezas para minimizar los impactos ambientales negativos asociados con la combustión del carbón. El proceso puede ser en húmedo, según tamaño y forma, o en seco, según las diferencias en densidad y fricción.
- Secado: disminución de humedad mediante calentamiento mecánico del carbón.
- Mezcla de carbones: combinación y homogeneización de carbones con diferentes propiedades para que la mezcla cumpla los requisitos del mercado.

iii) Transformación:

Conjunto de operaciones fisicoquímicas o metalúrgicas utilizadas para obtener un producto comercial no identificable con el material en su estado natural, tal como la destilación de carbón para producir coque, gas, amoníaco y brea entre otros [41].

iv) Transporte:

El carbón generalmente es transportado desde las minas en volquetas de 10 t, doble troques de 20 t y tractomulas de 40 t y en otros casos por barcazas, bandas transportadoras, cables aéreos y vías férreas. Es llevado a los patios de acopio, las plantas de beneficio y consumidores [41].

Según clasificaciones del carbón colombiano realizadas por el Grupo CERES en su departamento de ingeniería química y la Universidad de Antioquia [42], se tiene las propiedades químicas del carbón para este estudio (poder calorífico superior aproximadamente de 25.000 kJ/kg), las cuales se adaptan y se presentan en la Tabla 14.

En el análisis se adapta de Babcock & Wilcox y del estudio “*A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation*” [35], [43] un modelo de balance estequiométrico para la combustión de carbón y biomasa a partir del análisis último de los combustibles el cual es realizado con base al porcentual de masa (Tablas 12). El análisis masico es convertido a base molar dividiendo la fracción másica de cada elemento constituyente por su peso molecular. Así se obtiene el consumo de combustible, emisión de CO₂ y SO₂ en cogeneración. Esto se muestra en la sección de resultados.

Tabla 12. Propiedades químicas del carbón

Análisis próximo	(%)
Carbono Fijo (C _{fijo})	70.63
Material Volátil (MV)	11.22
Ceniza (Cz)	18.15
Análisis último	(%)
C	71.9
H	1.63
N	0
O	7.8
S	0.52
PCS (kJ/kg)	25.351
PCI (kJ/kg)	24.993

A continuación se describen las etapas de explotación y producción, beneficio, transformación y transporte de manera unificada en la mina de referencia.

La minería subterránea tiene diferentes métodos de extracción, los cuales están en función de las condiciones geológicas de la zona, la profundidad del yacimiento [35]. En el caso de referencia, se emplea la técnica de cámaras y pilares, la cual consiste en abrir distintos tajos o cámaras, en la que se deja zonas del terreno intacto el cual actúa como pilar para sostener la carga vertical.

Dicha mina de referencia tiene una producción de 100.000 toneladas de carbón mensuales. Su tiempo de operación es de 16 horas al día por 24 días al mes. Las etapas de producción de interés son la etapa de extracción (socavado, perforación, voladura y carga) y de beneficio. En la primera etapa, se obtiene el Carbón de Mina (carbón con contenido de relaves), el equipo utilizado es alimentado principalmente por electricidad, y también se cuenta con dispositivos que usan diésel. También es necesario contar con un sistema de ventilación en la mina con el fin de garantizar la calidad del aire y reducir gases peligrosos dentro de la mina. El agua subterránea es llamada Drenaje Acido de Mina (AMD), dos tercios del agua utilizada para la limpieza del Carbón de Mina proviene del AMD. Además, se utiliza aguas lluvias para mezclarla con el AMD en estanques de decantación para reducir el ácido. El Carbón de Mina se transporta desde la mina por medio de bandas transportadoras y su distancia total puede variar entre 7 y 8 km. En tanto el proceso de beneficio, este se encarga de que el carbón cumpla las especificaciones requeridas para la generación de energía, donde el carbón se tritura para tener un tamaño homogéneo, entre 25 y 32 mm y se limpia mediante el lavado con el fin de eliminar parte del material inerte y azufre. [35]. En la Fig. 16 se muestra el diagrama de proceso general para la extracción de carbón.

Nota: para la elaboración del inventario de ciclo de vida del carbón se utilizó como modelo la mina descrita previamente, adaptándola al caso de referencia del presente estudio. La finalidad del proyecto es académica aportando estudios nuevos en este campo.

El inventario será evaluado mediante el software OpenLCA para obtener el impacto en la huella de carbono. Ver el inventario del caso base y con uso de colectores en ANEXOS.

Es decir, que se requiere menos combustible para obtener la unidad funcional, dando como resultado un nuevo inventario que al ser procesado obtendrá un impacto diferente en la huella de carbono al calculado previamente.

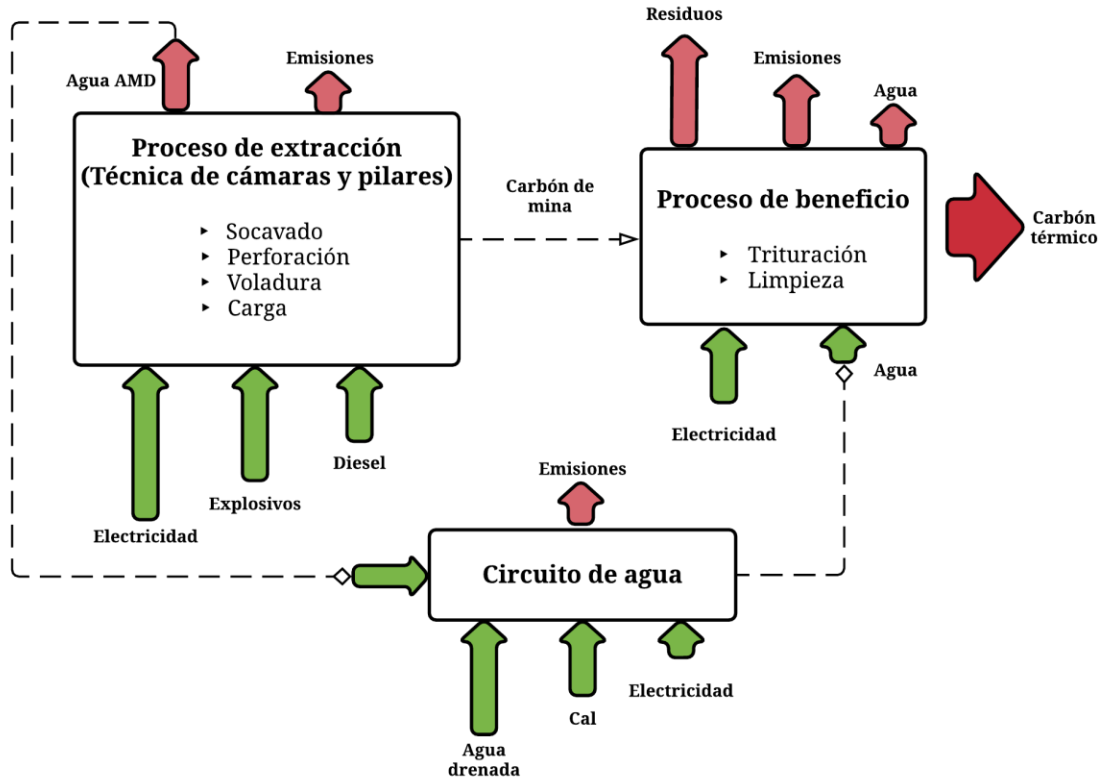


Fig. 16. Flujo de entradas y salidas para el carbón. Adaptado de [35].

3.1.4 Evaluación del impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) es la tercera fase del LCA cuyo objetivo es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (LCI) del sistema en estudio, es decir los colectores solares y los procesos asociados en la planta de cogeneración de referencia [5].

Con los procesos anteriores se ha podido observar que cada etapa de un sistema se puede analizar revisando cada entrada y salida. Asimismo, se puede hacer con cada insumo obtenido en los inventarios de ciclo de vida; por ejemplo, la producción de diésel y gasolina corriente tienen su propio inventario de entradas y salidas para obtener estos insumos. Es por esta razón que la evaluación del impacto ambiental asociado a un sistema está en función del impacto ambiental de los procesos y subprocesos del sistema, esto hace que esta evaluación sea de alta complejidad si no se hace por medio de un software. Hay distintos tipos de software para realizar LCA, como es el SimaPro, GaBi, Solid Forest, SoftExpert PLM, OpenLCA, entre otros. Para este caso, el inventario

será evaluado mediante el software OpenLCA. En los ANEXOS se encuentra un paso a paso del uso del software.

Sin embargo, es necesario que adicional al software, se cuente con una base de datos robusta que contenga procesos ya evaluados, así se puede realizar la evaluación de impacto del bagazo y el carbón sin necesidad de generar nuevos inventarios para el diésel, gasolina corriente, químicos, etc. En este proyecto no fue posible emplear una base de datos más robusta como Ecoinvent por lo cual, se utilizaron bases de datos gratuitas que proporciona OpenLCA.

Adicional a las bases de datos, es necesario establecer un método de evaluación de impacto, el cual, se ha mencionado de manera implícita en el proyecto. El método de impacto depende del objetivo del análisis, por ejemplo, si se desea evaluar la acidez del medio ambiente, o qué tan cancerígenos pueden ser las emisiones asociadas a los procesos, se recomienda usar el método del Ecoindicador 99 o ReCipe Endpoint; si se desea realizar un análisis de huella de carbono asociado a los procesos, se recomienda el método de Global Warming Potential a 20 o 100 años del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

Las categorías de impacto para los estudios fueron Potencial de Calentamiento Global (GWP) y Acidificación Terrestre. El Potencial de Calentamiento Global (GWP) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), consiste en que cada gas de efecto invernadero (GEI) posee un potencial de calentamiento global diferente que se mantiene en la atmosfera por un periodo de tiempo determinado. El método consiste en que cada emisión de GEI tiene su equivalente al CO_2 , y estas equivalencias son útiles para poder comparar dichas emisiones [44]. Así, el método compara no solo los principales GEI (*dióxido de carbono* – CO_2 , *metano* – CH_4 y *ácido nitroso* – N_2O) a 20 o 100 años, sino también gases de efecto invernadero menos frecuentes como el hexafluoruro de azufre – SF_6 , hidrofluorocarbonos – HFC y perfluorocarbonos – PFC [44]. Y la Acidificación terrestre de manera similar recopila información de los procesos cuyas emisiones poseen equivalencias al SO_2 . Se cuenta con múltiples subprocesos asociados al sistema en estudio, por lo cual, cada subproceso puede tener múltiples emisiones de GEI adjuntas. El software OpenLCA es el encargado de procesar la información y obtener la masa de $\text{CO}_2\text{-eq}$. Para el caso de estudio se seleccionó el método a 100 años.

En el CAPITULO IV se llevará a cabo la fase final del LCA: La Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida.

4 RESULTADOS

Los resultados del LCA del uso del sistema de recolección solar para el ingenio de referencia permiten conocer qué procesos del ciclo de cogeneración presentan mayor carga ambiental en función de la huella de carbono y la acidificación terrestre.

Del proyecto “*Análisis Energético y Exergético de una Planta de Cogeneración del Sector Azucarero Asistida por Colectores Solares*” realizado por estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira [3], se adapta la información de los requerimientos de los generadores de vapor y el consumo de carbón y bagazo. Se condensó esta información para este caso base en la Tabla 13.

Tabla 13. Caso base. Condiciones de operación de los generadores de vapor.

	Indicador	Unidad
Demanda de vapor	35,4	kg/s
Consumo de bagazo	1,59E+01	kg/s
Consumo de carbón	3,97E-01	kg/s

Estandarizando, para obtener la unidad funcional (1 t_{vap}), se tiene la Tabla 14.

Tabla 14. Caso base. Valores de consumo de bagazo y carbón para obtener la unidad funcional.

	Indicador	Unidad
Demanda de vapor	1	t
Consumo de bagazo	4,50E+02	kg
Consumo de carbón	1,12E+01	kg

Es decir que se deben quemar 450,08 kg_{bag} y 11,23 kg_{car} en los generadores para obtener 1 t_{vap} .

Al implementar los colectores tipo Lineal Fresnel, el consumo de combustible se reduce hasta un 8,6 % [3]. Por lo que, los requerimientos de combustible quedan de la siguiente manera (Tabla 15).

Tabla 15. Valores de consumo de bagazo y carbón para obtener la unidad funcional con colectores

	Indicador	Unidad
Demanda de vapor	1	t
Consumo de bagazo	4,11E+02	kg
Consumo de carbón	1,03E+01	kg

4.1 Interpretación del LCA

El software OpenLCA procesó la información recopilada en los inventarios de ciclo de vida. Sin embargo, también fue necesario suministrarle al software la información relacionada con la combustión de bagazo y carbón. Estos datos fueron proporcionados por el modelo estequiométrico programado en el Software EES, donde se obtiene como resultado la masa de CO₂ y SO₂ emitidas debido a la combustión de bagazo y carbón. Esta información está consignada en las Tablas 16 y 17.

Tabla 16. Inventario de combustión de bagazo. (Unidad funcional: 1 tonelada de vapor de agua).

Sin colectores	Indicador	Unidad
CO ₂	3,30E+02	kg
Con colectores		
CO ₂	3,01E+02	kg

Tabla 17. Inventario de combustión de carbón. (Unidad funcional: 1 tonelada de vapor de agua).

Sin colectores	Indicador	Unidad
CO ₂	2,96E+01	kg
SO ₂	1,17E-010	kg
Con colectores		
CO ₂	5,25E+01	kg
SO ₂	2,07E-01	kg

Como se ha mencionado previamente, la unidad de cogeneración en el caso de estudio utiliza 90% de la masa del bagazo y 10% la masa del carbón como combustibles para generar vapor. Sin embargo, mediante el modelo estequiométrico utilizado se puede obtener información de cuánto

CO₂ y SO₂ se puede emitir producto de la combustión para diferentes relaciones de biomasa – carbón. Por ejemplo, las Figs. 17 y 18 muestran diferentes cantidades de emisiones de CO₂ y SO₂ al quemar los combustibles.

Nota: Debido a que la composición de bagazo seleccionada [3] no presenta contenido de azufre (S), no se registran datos de emisión de dióxido de azufre (SO₂).

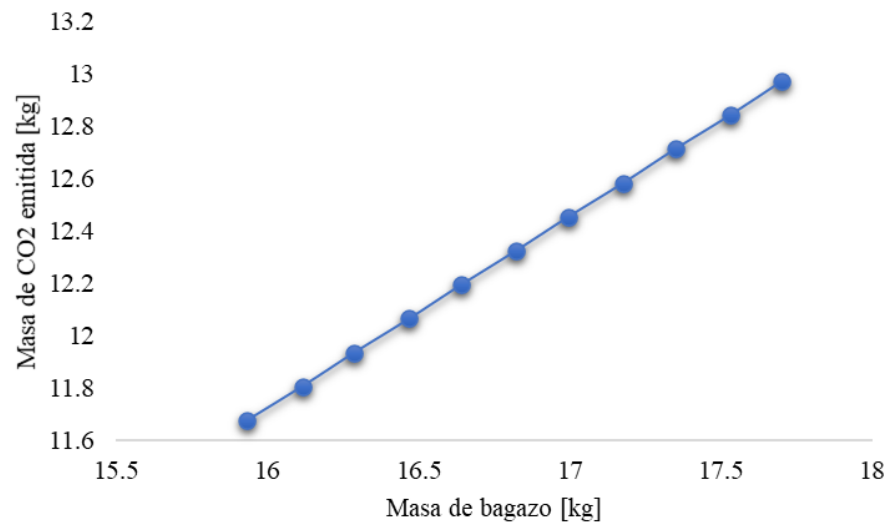


Fig. 17. Emisión de kg de CO₂ por kg de bagazo

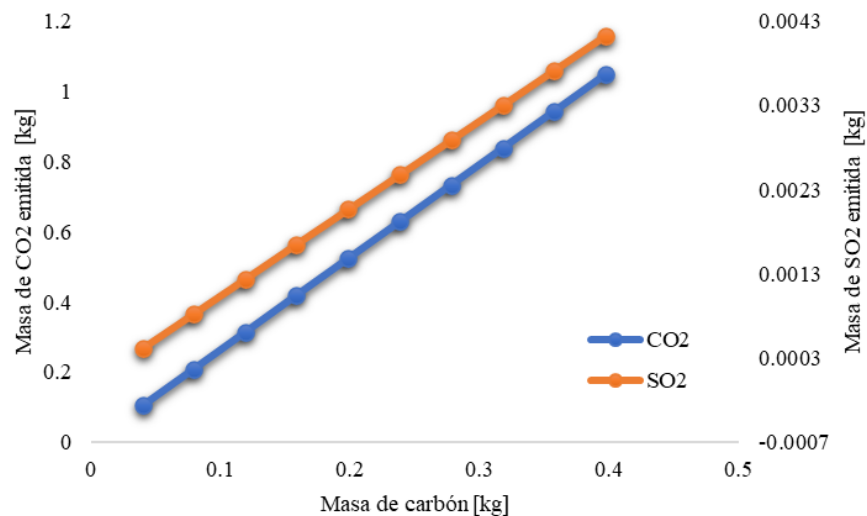


Fig. 18. Emisión de kg de CO₂ y SO₂ por kg de carbón

Luego, se muestra la Tabla 18, donde de manera general se presentan los resultados en los casos de estudio: el ciclo sin y con colectores.

En cada caso, se observa la reducción de emisiones de kg CO_{2-eq} debido a la reducción de combustible que a su vez se debe a la implementación de los colectores solares. Por cada tonelada de vapor de agua producida con colectores solares tipo Lineal Fresnel, se están dejando de emitir 77 kg CO_{2-eq}, los cuales se muestran distribuidos en la Tabla 18 y la Fig. 19. Por otro lado se tiene emisiones reducidas para acidificación, donde se presenta una reducción de 0,66 kg SO_{2-eq}. Se resalta en la Tabla 18 los procesos de mayor impacto a la huella de carbono y acidificación terrestre.

Tabla 18. Resultados para 1 t de vapor

	Sin colectores	Con colectores
GWP -100	kg CO_{2-eq}	kg CO_{2-eq}
Producción de bagazo	5,05E+02	4,62E+02
Producción de carbón	1,08E+01	9,86E+00
Combustión de carbón	2,97E+01	2,71E+01
Combustión de bagazo	3,31E+02	3,01E+02
Total	8,77E+02	8,00E+02
Acidificación terrestre	kg SO_{2-eq}	kg SO_{2-eq}
Producción de bagazo	7,61E+00	6,96E+00
Producción de carbón	1,08E-02	9,67E-02
Combustión de carbón	1,06E-01	9,91E-03
Total	7,73E+00	7,07E+00

Debido al 8,6% de ahorro en combustibles, se puede observar la misma proporción en las emisiones de CO_{2-eq} y SO_{2-eq} en todos los procesos del bagazo y el carbón, ver Fig. 19. Se puede observar también que el proceso que presenta una mayor cantidad de kg CO_{2-eq} es la producción de bagazo (procesos de siembra, cosecha y fábrica) y esto es debido a la demanda elevada de bagazo en comparación del carbón

En la Tabla 19 se presentan los resultados de los subprocesos que más influyen en el impacto a la huella de carbono.

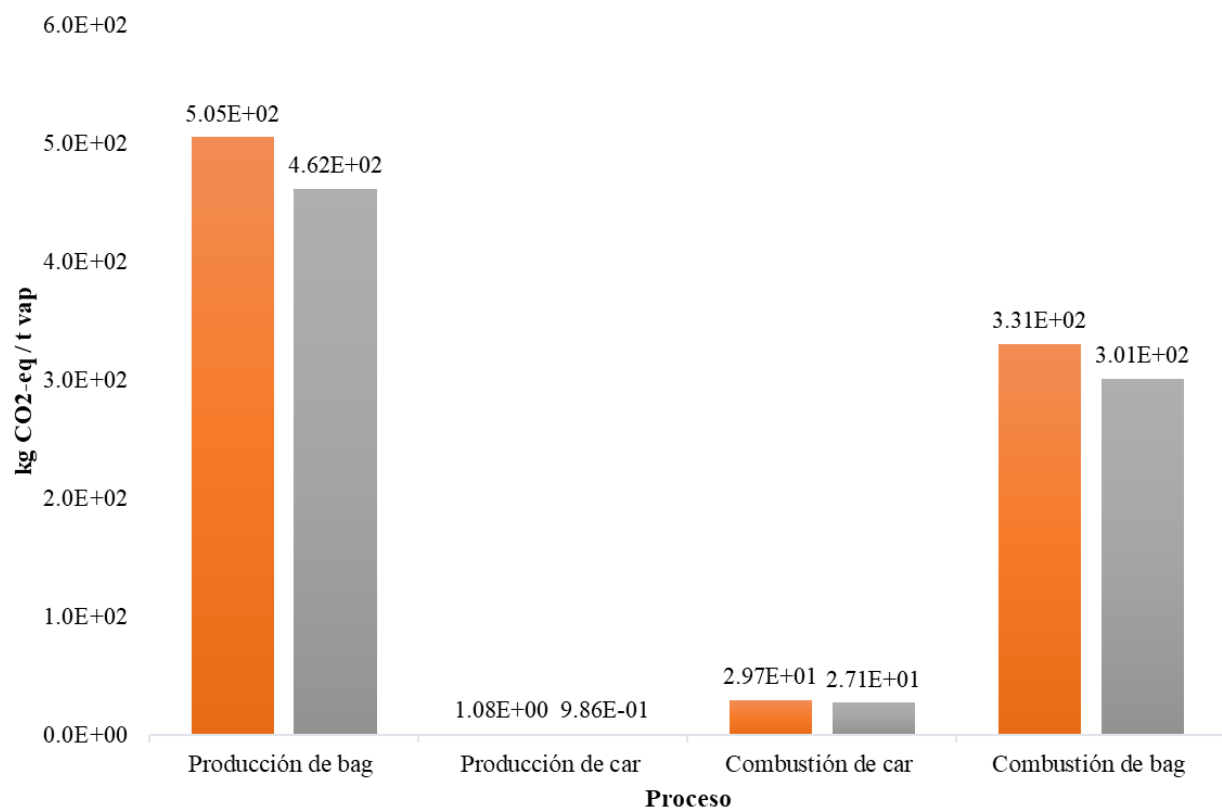


Fig. 19. IPCC GWP 100. Resultados para 1 t de vapor

Tabla 19. Resultado para el bagazo con y sin colectores. GWP - 100 y acidificación terrestre

Sin colectores			Con colectores	
	GWP	Acidificación	GWP	Acidificación
	kg CO _{2eq}	kg SO _{2eq}	kg CO _{2eq}	kg SO _{2eq}
Campo	2,80E2	2,70	2,55E2	2,47
%	55,3%	35,43%	55,3%	35,4%
Cosecha	2,23E2	4,12	2,04E2	3,77
%	44,2%	54,12%	44,2%	54,12%
Fábrica	2,53	7,95E-1	2,31	7,28E-1
%	0,5%	10,45%	0,5%	10,45%
Combustión	3,31E2	0	3,01E2	0

Así, se puede observar en los datos subrayados, los procesos con mayor porcentaje de influencia en la emisión de CO₂-eq y acidificación terrestre. Para el bagazo, se puede observar que los procesos

de campo poseen la mayor emisión de gases de efecto invernadero, un total de 280 kg CO₂-eq, y el proceso de cosecha en cambio, contribuye más que los demás procesos de obtención del bagazo a la acidificación terrestre con 4,12 kg SO₂-eq.

En el caso donde se implementa el campo solar, se presenta de manera proporcional al ahorro de combustible, la misma reducción de emisiones. A continuación se presenta en la Fig. 20 los resultados de cada emisión por proceso.

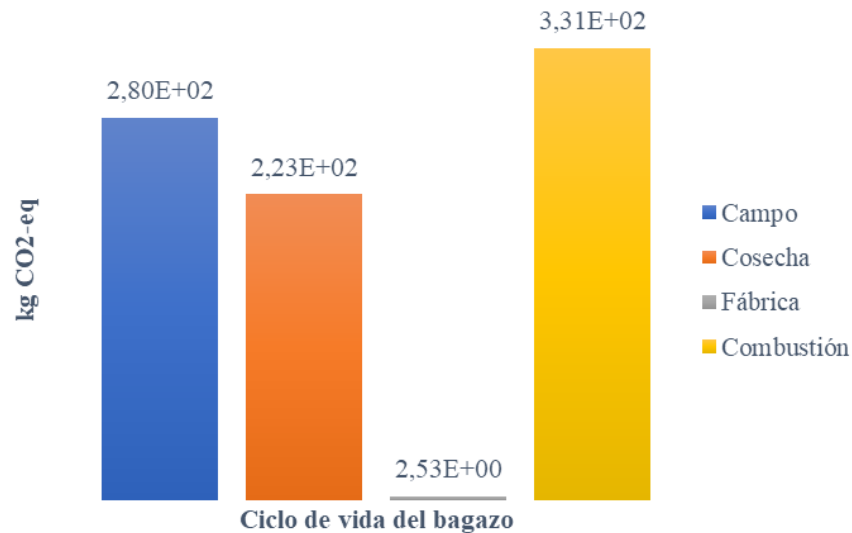


Fig. 20. Resultados GWP 100 para el ciclo de vida del bagazo. Sin colectores

En todo el ciclo de vida del bagazo, la etapa que más emisiones CO₂-eq genera es la combustión, con 331 kg CO₂-eq / t vapor. Asimismo, el proceso que menos emisiones produce es el proceso de fábrica. En la Fig. 21 se muestran los mismos procesos para el caso de la acidificación terrestre.

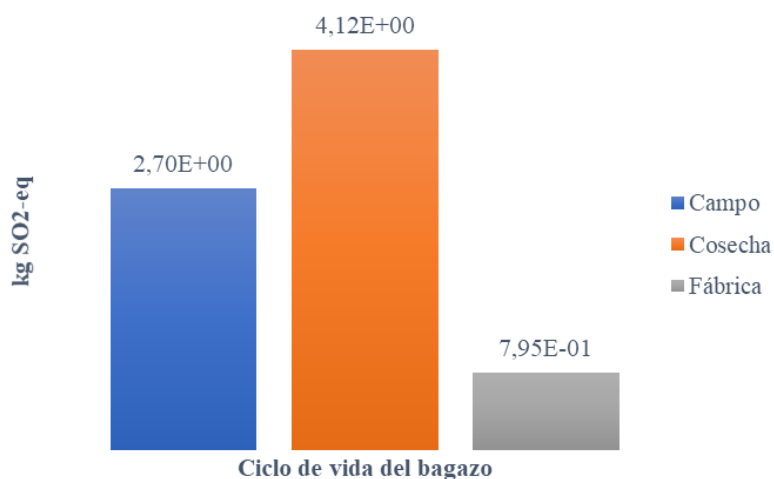


Fig. 21. Resultados acidificación para el ciclo de vida del bagazo. Sin colectores

En todo el ciclo de vida del bagazo, la etapa de cosecha es la que más afecta la acidificación terrestre llegando a generar por cada tonelada de vapor 4,12 kg SO_{2-eq}.

En la Fig. 22 se observa el caso del carbón, donde se analiza el proceso de minería junto con el proceso de combustión. Para este ciclo de vida, la etapa de combustión es la que más produce emisiones de CO_{2-eq}., en total 29,7 kg CO_{2-eq} por cada tonelada de vapor y tan solo 1,08 kg CO_{2-eq} debido al proceso de minería.

Luego, la Fig. 23 presenta el mismo ciclo de vida con respecto a la acidificación. Igualmente, el proceso de combustión es el mayor emisor de SO_{2-eq}, con 0,106 kg SO_{2-eq}.por tonelada de vapor generada.

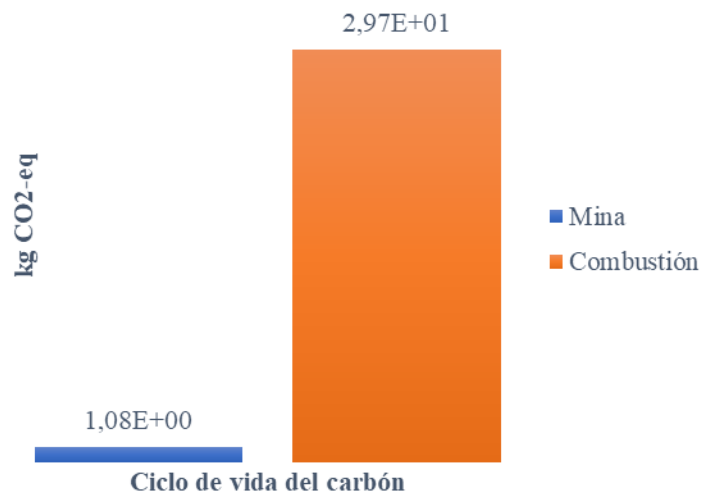


Fig. 22. Resultados GWP 100 para el ciclo de vida del carbón. Sin colectores

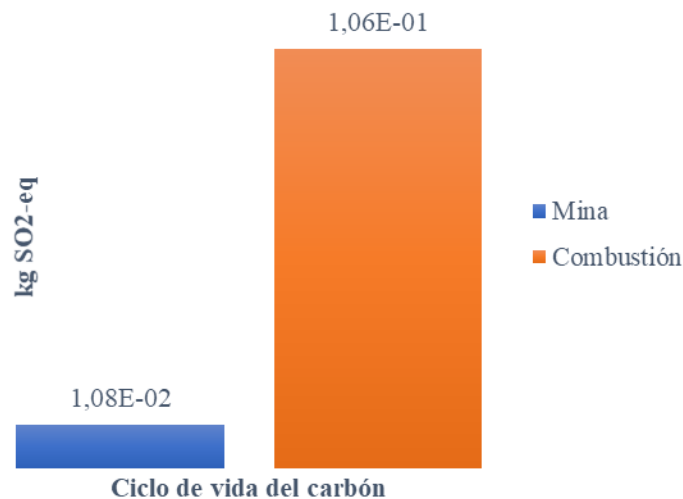


Fig. 23. Resultados acidificación para el ciclo de vida del carbón. Sin colectores

Ahora, para el caso de la implementación de los colectores solares, se sigue manteniendo la proporción como fue mostrado en la Tabla 19. Así, estas son las gráficas respectivas:

El ciclo de vida no cambia, solo los requerimientos de combustible. La Fig. 24 muestra el mismo ciclo de vida con la reducción de emisiones del 8,6% debido a la reducción de combustible en la misma proporción.

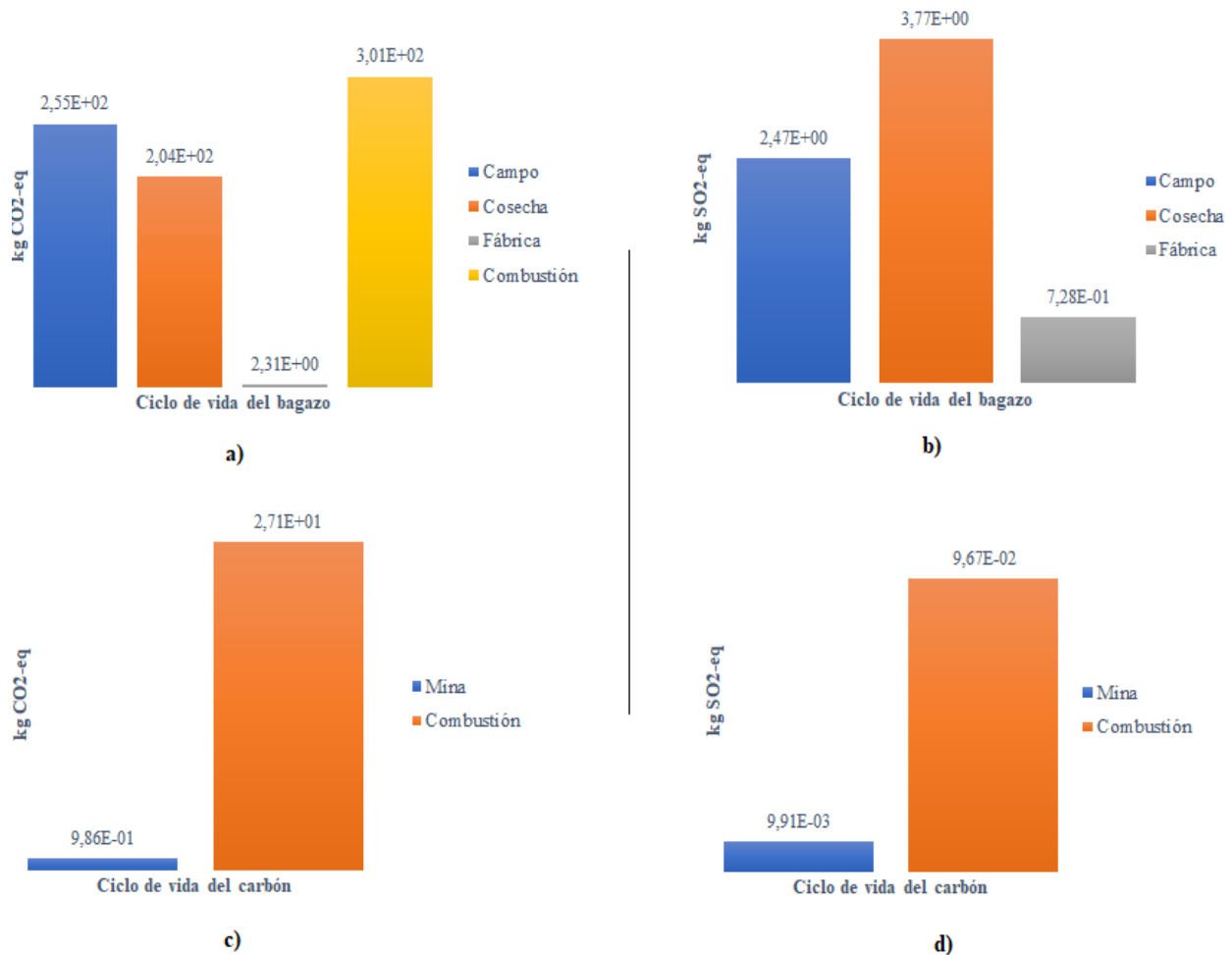


Fig. 24. Resultados con colectores. a) GWP 100 para el ciclo de vida del bagazo. b) acidificación para el ciclo de vida del bagazo. c) GWP 100 para el ciclo de vida del carbón. d) acidificación para el ciclo de vida del carbón.

Para el caso de cogeneración sin uso de colectores, los resultados obtenidos para la unidad funcional fueron 877 kg CO₂-eq por cada tonelada de vapor generada. Por otro lado, para el uso de colectores solares en el ciclo de cogeneración, se emiten 800 kg CO₂-eq por cada tonelada de vapor

generada, de los cuales el 58% son debido al proceso productivo de obtención del bagazo, 38% a la combustión de bagazo, 3% a la combustión de carbón y 1% a la producción de carbón.

Asimismo, para el caso de la acidificación, la producción de bagazo participa con un 98,5% en la acidificación terrestre, la razón de esto se debe al consumo de combustibles debido al proceso productivo que tiene este combustible. Luego, debido a la combustión de carbón se presenta 1,37 % en participación. Para luego la producción de carbón tener 0,14 %.

De lo anterior se tiene una acidificación total de 7,73 kg SO_{2-eq} para el sistema sin colectores, y 7,07 kg SO_{2-eq} para el caso del uso de colectores, presentándose una disminución del 0,657 kg SO_{2eq}/t_{vap}

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó un LCA del ciclo de cogeneración en estudio usando colectores solares, según la norma ISO 14040. Se definió el alcance del análisis y la unidad funcional, el inventario de ciclo de vida y su análisis, y posteriormente el análisis de los resultados del LCA.

Se concluye que el paso más importante del LCA es la elaboración del inventario de los productos, subproductos o procesos, así, a mayor exactitud en el inventario de ciclo de vida, menor incertidumbres se presentarán en los resultados

Se realizó el inventario de ciclo de vida identificando las entradas y salidas al usar colectores solares en un ciclo de cogeneración en la industria azucarera. En el cual, en su ciclo de cogeneración quema 90 % bagazo y 10% carbón, y se llegó a la conclusión que si el inventario de ciclo de vida es la etapa más importante del proceso, la disponibilidad de las bases de datos robusta y precisa es valiosa también, por lo que en caso de realizar estudios más profundos, certificaciones industriales o cambios en alguna empresa, se recomienda contar con una base de datos más completa, como lo es Ecoinvent. Al utilizar bases de datos gratuitas, se posee amplia información; sin embargo, sigue siendo limitada si el análisis a realizar es robusto.

Se seleccionaron los indicadores de desempeño ambiental necesarios según la norma ISO 14040 para evaluar el impacto ambiental asociado a la operación del ciclo de cogeneración objeto de estudio. Donde los indicadores más relacionados con el impacto ambiental son los listados por el Panel intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC, que mide la huella de carbono asociada a los procesos de un sistema y la acidificación terrestre asociada al dióxido de azufre emitido por los procesos. En otras palabras, los indicadores escogidos fueron $\text{kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{t}_{\text{vap}}$ y $\text{SO}_{2\text{-eq}}/\text{t}_{\text{vap}}$.

Se analizaron los resultados obtenidos del análisis del ciclo de vida y así se determinó el impacto ambiental de los colectores solares y su influencia sobre el desempeño ambiental del ciclo de cogeneración, dando como resultado una disminución del 8,8% en las emisiones de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$. Es decir, que el implementar los colectores solares, se presenta un ahorro de $77 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}} / \text{t}_{\text{vap}}$.

Se concluye que las emisiones provenientes de la producción y quema de bagazo son más altas a las del carbón debido a que la biomasa propiamente dicha, se requiere mayores cantidades que las del combustible fósil.

El proceso de mayor impacto fue la producción de bagazo debido al alto consumo requerido de esta biomasa en la unidad de cogeneración.

Una propuesta para futuros análisis podría ser un estudio termo económico de la planta en cuestión, y así tener una tricotomía completa del costo/beneficio en términos, ambientales, energéticos y económicos a la hora de implementar colectores en el ingenio estudiado y determinar así, si es viable ambiental, energética y económicamente implementar el sistema de recolección solar. Puesto que el análisis ambiental realizado arrojó que la implementación de los colectores solares disminuye el impacto a la huella de carbono en 77 kg CO₂-eq y acidificación en 0,657 kg SO₂-eq por tonelada de vapor.

Se concluye que el proceso de obtención del bagazo que comprende las etapas de siembra, cosecha y fábrica de la caña de azúcar, es el proceso que produce mayor impacto en ambos indicadores debido al alto consumo de combustible que se requiere en dichas etapas. Así, el 58 % del impacto en la huella de carbono es debido a la producción de bagazo y el 98,5 % del impacto a la acidificación terrestre también hace parte del productivo del bagazo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Remica, “Tipos de Energía,” *Diferencia entre renovables y no renovables*, 2019. <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/#:~:text=Las energías no renovables%3A,natural o la energía nuclear.> (accessed Feb. 08, 2020).
- [2] U. Desideri, F. Zepparelli, V. Morettini, and E. Garroni, “Comparative Analysis of Concentrating Solar Power and Photovoltaic Technologies: Technical and Environmental Evaluations,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 765–784, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.08.033.
- [3] A. Escobar Vanegas and D. A. Cárdenas Restrepo, “Análisis Energético y Exergético de una Planta de Cogeneración del Sector Azucarero Asistida por Colectores Solares,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [4] J. Gómez, J. D. Murcia, and I. Cabeza, “La Energía Solar Fotovoltaica en Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas,” Universidad Santo Tomás, 2017.
- [5] International Organization for Standardization (ISO), “Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework,” 2006.
- [6] M. Y. Recalde, D. H. Bouille, and L. O. Girardin, “Limitaciones para el Desarrollo de Energías Renovables en Argentina,” *Probl. Desarro.*, vol. 46, no. 183, pp. 89–115, 2015, doi: 10.1016/j.rpd.2015.10.005.
- [7] M. A. Planas Marti and J. C. Cárdenas, “La matriz energética de Colombia se renueva,” *Energía para el futuro*, 2019. <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/>.
- [8] UPME “Unidad de Planeación Minero Energetica,” “BALANCE ENERGETICO COLOMBIANO - BECO,” *Versión 14, Revisión 6*. <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BECOCONSULTA.aspx>.
- [9] UPME “Unidad de Planeación Minero Energetica,” T. Gonzáles Estrada, and J. A. Valencia Marín, “Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,” *Minist.*

Minas y Energía, p. 22, 2015, doi: 10.1021/ja304618v.

- [10] S. N. Kane, A. Mishra, A. K. Dutta, Jilin Province Electric Research Institute CO. LTD - Changchun - China, and College of Automotive Engineering. Jilin University - Changchun - China, “The Characteristic Analysis of the Solar Energy Photovoltaic Power Generation System,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 755, no. 1, pp. 0–6, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
- [11] J. C. López Restrepo., “Análisis Termoeconómico del Ciclo de Cogeneración de una Planta Azucarera Asistido por Energía Solar,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [12] X. Pedruzo-Bagazgoitia, H. G. Ouwersloot, M. Sikma, C. C. van Heerwaarden, C. M. J. Jacobs, and J. V. G. de Arellano, “Direct and diffuse radiation in the shallow cumulus-vegetation system: Enhanced and decreased evapotranspiration regimes,” *J. Hydrometeorol.*, vol. 18, no. 6, pp. 1731–1748, 2017, doi: 10.1175/JHM-D-16-0279.1.
- [13] N. Corrocher and E. Cappa, “The Role of public interventions in inducing private climate finance: An empirical analysis of the solar energy sector,” *Energy Policy*, vol. 147, p. 111787, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111787.
- [14] IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2012: an OverviewNo Title,” *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2013)*. <https://www.irena.org> (accessed Oct. 02, 2020).
- [15] REN21, “Private finance for climate action. Estimating the effects of public interventions,” 2019. <https://www.ren21.net/gsr-2019/> (accessed Oct. 02, 2020).
- [16] SolarPower Europe, “Global market outlook 2019-2023,” *Leading the energy transition*, 2019. <https://www.solarpowereurope.org> (accessed Feb. 08, 2020).
- [17] G. Ma, Z. Yin, X. Liu, J. Qi, and Y. Dai, “Developments of CPC solar evacuated glass tube collector with a novel selective coating,” *Sol. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.08.052.
- [18] P. Horta, C. Brunner, K. Kramer, and E. Frank, “IEA/SHC T49 Activities on Process Heat Collectors: Available Technologies, Technical-Economic Comparison Tools, Operation and Standardization Recommendations,” *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 630–637, 2016, doi:

10.1016/j.egypro.2016.06.217.

- [19] Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Tecnológico de Monterrey | Innovación Educativa, Laboratorio Binacional para la Gestión Inteligente de la Sustentabilidad Energética y la Formación Tecnológica, and CONACYT-SENER Fondo de Sustentabilidad Energética, “Colectores Solares Térmicos,” 2016. https://www.youtube.com/watch?v=HHKvjKAJAhk&ab_channel=TecnológicodeMonterrey%7CInnovaciónEducativa.
- [20] Solar Platform America Latina, “Colector Solar Plano,” *Energía Solar Térmica*, 2017. <http://www.energiasolar.lat/colector-solar-plano/>.
- [21] AGM Energías Renovables, “Energía Solar Térmica, Colectores de Tubos Evacuados,” *Diseño e Implementación de Sstemas Energéticos Sustentables*, 2015.
- [22] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 231–295, 2004.
- [23] A. V. Santos, D. Canavarro, and M. Collares-Pereira, “The gap angle as a design criterion to determine the position of linear Fresnel primary mirrors,” *Renew. Energy*, vol. 163, pp. 1397–1407, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.017.
- [24] D. Canavarro, J. Chaves, and M. Collares Pereira, “Improved design for linear Fresnel reflector systems,” *Adv. Conc. Sol. Therm. Res. Technol.*, pp. 44–45, 2017.
- [25] D. Mills, “Linear Fresnel reflector (LFR) technology,” *Conc. Sol. Power Technol.*, pp. 153–196, 2012.
- [26] H. Schenk, T. Hirsch, J. F. Feldhoff, and M. Wittmann, “Energetic Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector Systems,” *J. Sol. Energy Eng. ASME*, vol. 136, no. 4, p. 11, 2014.
- [27] G. Morin, M. Karl, M. Mertins, and M. Selig, “Molten Salt as a Heat Transfer Fluid in a Linear Fresnel Collector - Commercial Application Backed by Demonstration,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 689–698, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.079.
- [28] D. Panaroni, M. Mujica, M. A. Matos, L. Corujo, A. C. Luna, and L. Martorelli, “Diseño

- óptico de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor.,” *Univ. Nac. la PLata Argentina*, 2017, [Online]. Available: <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6785>.
- [29] Transfield, “Transfield Investments, Novatec Solar,” *Investments*, 2019. <https://www.transfield.com.au/novatec-solar> (accessed Feb. 08, 2020).
- [30] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ma ed. Mc Graw Hill, 2012.
- [31] H. Torrealba, “Análisis de Ciclo de Vida. El Ciclo de Vida aplicado a un servicio,” *Red internacional ISO Expertos*, 2016. www.rediie.com (accessed Feb. 10, 2020).
- [32] Varun, I. K. Bhat, and R. Prakash, “LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 5, pp. 1067–1073, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.004.
- [33] J. C. López, Á. Restrepo, and E. Bazzo, “Exergy Analysis of the Annual Operation of a Sugarcane Cogeneration Power Plant Assisted by Linear Fresnel Solar Collectors,” *J. Sol. Energy Eng. ASME*, vol. 140, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1115/1.4040534.
- [34] Comunicaciones Energía de Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira, and A. M. Gallego, “Energía de Pereira,” *News*, 2019. <https://www.eep.com.co/noticias/870-el-sistema-solar-fotovoltaico-en-la-utp-ya-esta-en-funcionamiento>.
- [35] Á. Restrepo, E. Bazzo, and R. Miyake, “A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 92, pp. 179–186, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.065.
- [36] A. Korre, S. Durucan, and G. Munoz-Melendez, “Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 14, no. 12-13 SPEC. ISS., pp. 1057–1070, 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.12.021.
- [37] Ingenio Risaralda, “Ingenio Risaralda,” *Proceso productivo*, 2020. [https://www.azucar.com.co/es/ipaginas/ver/G299/124/Proceso Productivo/](https://www.azucar.com.co/es/ipaginas/ver/G299/124/Proceso%20Productivo/).
- [38] L. F. Gonzáles Ramírez, “Análisis de ciclo de vida de la producción de bioetanol de la caña de azúcar. Estudio de Caso: Ingenio Risaralda S.A.,” Universidad Tecnológica de Pereira,

2020.

- [39] CENICAÑA, “Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA),” 2020. <https://www.cenicana.org/programa-de-agronomia/>.
- [40] P. S. Domínguez and G. A. Cárdenas, “La cosecha de la caña de azucar. Gobernación de Antioquia, Secretaría de Agricultura y Fomento, Industrialización de la Caña.” http://digitool.gsl.com.mx:1801/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1490462961604~153.
- [41] UPME “Unidad de Planeación Minero Energetica,” Ministerio de Minas y Energía, and Subdirección de Planeación Minera, “La Cadena del carbón. El Carbón Colombiano. Fuente de Energía para el mundo,” Colombia.
- [42] R. Barrera Zapata, J. F. Pérez Bayer, and C. Salazar Jiménez, “Colombian coals: classification and thermochemical characterization for energy applications,” *Rev. ION*, vol. 27, no. 2, pp. 43–54, 2014, [Online]. Available: http://apps.webofknowledge.com.etechnology.idm.oclc.org/full_record.do?product=SCIELO&search_mode=GeneralSearch&qid=44&SID=4Bsd1xY6XMQ7quQiYfU&page=1&d oc=22&cacheurlFromRightClick=no.
- [43] Babcock and Wilcox, “Babcock & Wilcox,” *B&W ENVIRONMENTAL*. <https://www.babcock.com/>.
- [44] Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), “Climate Change,” *CO2 EQUIVALENTS*, 2013. <https://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalents/>.

ANEXO 1: INVENTARIOS DE CICLO DE VIDA

Tabla 20. Inventario de Ciclo de Vida del bagazo (Unidad funcional: 1kg_{bag}). [38].

	Indicador	Unidad
Datos de entrada		
Caña de azúcar	4.27	kg
Diésel	2.07E-03	gal
Gasolina corriente	1.24E-01	gal
Agua	1.37E-02	m ³
Ametrina	3.81E-05	kg
Diuron	4.62E-05	kg
Acido 2-4D	4.47E-05	kg
Glifosato	3.78E-05	kg
Carbonato de calcio	9.08E-05	kg
Úrea al 46%	2.10E-04	kg
Fusilade	1.51E-05	kg
Bonus (Moddus®)	5.84E-06	kg
Datos de salida		
<u>Emisiones al aire</u>		
CH ₄	1.39E-02	kg
CO ₂	1.39E+01	kg
CO	9.18E-01	kg
SO ₂	1.09E-01	kg
<u>Emisiones al suelo</u>		
Cobre	6.39E-09	kg
Níquel	1.23E-09	kg
Plomo	9.01E-07	kg
Zinc	8.75E-03	kg
Jugos y subproductos	3.27	kg

Tabla 21. Inventario de Ciclo de Vida del carbón (Unidad Funcional: 1kg_{car}). [38]

Inventario del carbón	Indicador	Unidad
Datos de entrada		
Carbón de mina	2.39	kg
Electricidad	4.61E-02	kWh
Agua (AMD)	4.34E-03	m ³
Agua (Agua superficial drenada)	2.65E-03	m ³
Explosivos	1.48E-03	kg
Diésel	5.42E-02	MJ
Caliza	3.50E-03	kg
Datos de salida		
<u>Emisiones al aire</u>		
CH ₄	2.44E-03	kg
CO ₂	2.24E-04	kg
<u>Emisiones al agua</u>		
Sólidos totales	1.86E-02	kg
Sulfato	9.52E-03	kg
Aluminio	5.38E-06	kg
Cobre	3.50E-08	kg
Hierro	5.43E-06	kg
Manganeso	2.73E-05	kg
Zinc	9.79E-07	kg
Residuos	1.39	kg

ANEXO 2: GUÍA DE USO DEL SOFTWARE OPENLCA

A continuación, se presenta una guía de uso del *Software* OpenLCA.

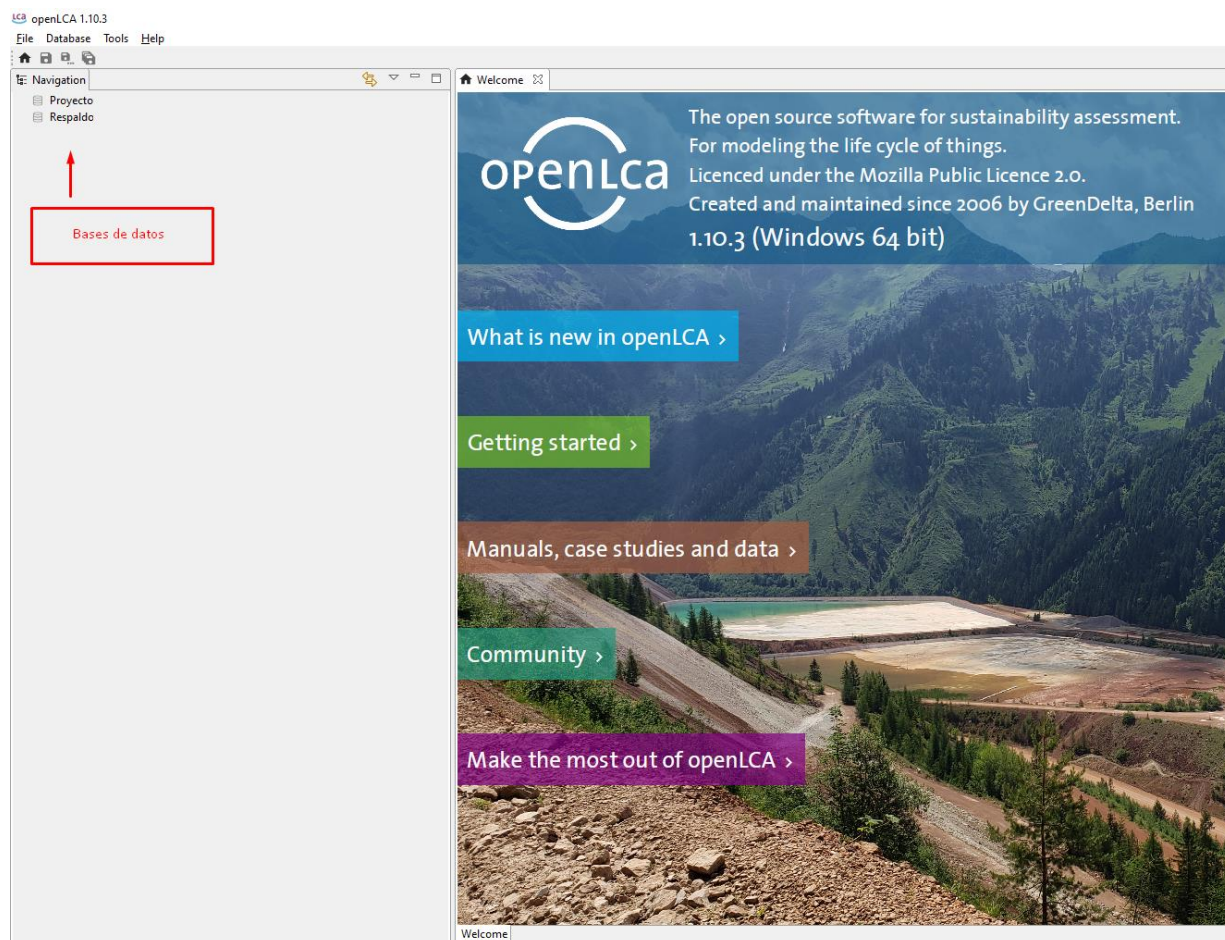


Fig. 25. Guía del uso del Software OpenLCA

Al iniciar el software, se observa la interfaz de bienvenida (Fig.25). En el panel izquierdo aparecen las bases de datos una vez estén cargadas.

1 Cargue de base de datos y métodos de evaluación de impacto

Para cargar una base de datos se le da clic derecho al panel izquierdo, se selecciona “import database” y se selecciona el archivo de base de datos con extensión .zolca.

Una vez abierta la base de datos, es necesario ingresar los métodos de evaluación de impacto, estos archivos también tienen extensión .zolca.

Para importar la base de datos se debe abrir la base de datos con doble clic. Posteriormente, abrir “indicators y parameters”. Después clic derecho en “impact assessments methods” y luego “import”, ver Fig. 26.

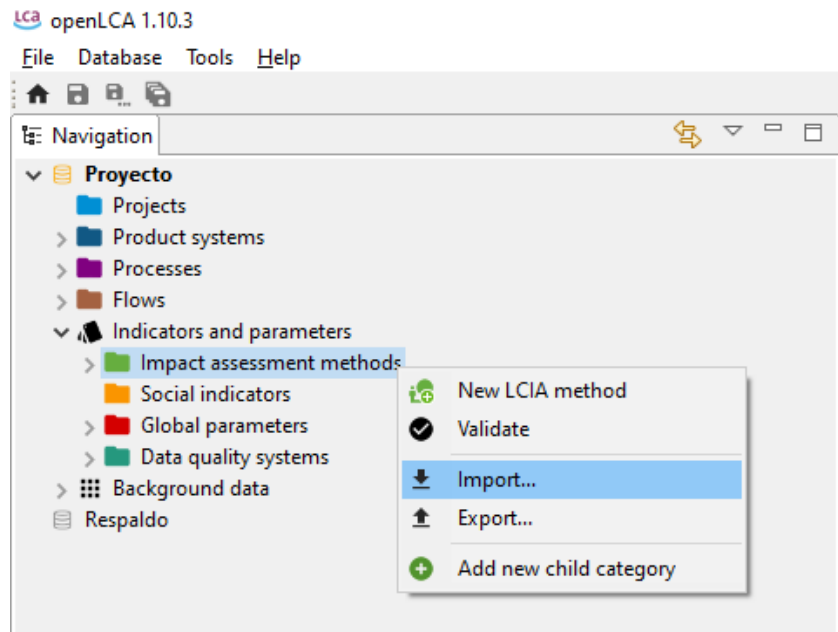


Fig. 26. Importar métodos de impacto

Una vez se tenga cargados estos elementos, ya se puede empezar a configurar el sistema deseado.

Se debe tener en cuenta cuales son los procesos y cuáles son los flujos. Los flujos de entrada pueden ser insumos que en el proceso se transformarán en emisiones. Para esta guía se creará un proceso de los del proyecto.

2 Creación del sistema:

Es recomendable empezar creando los flujos. Para ello, se debe remitir a la carpeta “flows”. Si la carpeta se abre, allí aparecerán todos los flujos provenientes de las bases de datos. Para crear un nuevo flujo, dar clic derecho en la carpeta “flows”, luego “new Flow”, ver Fig. 27. Posteriormente, se establece el nombre del flujo y se elige el tipo. En “Reference Flow property” se selecciona las unidades del flujo. Los flujos son las entradas y las salidas de los procesos. Fig. 28.

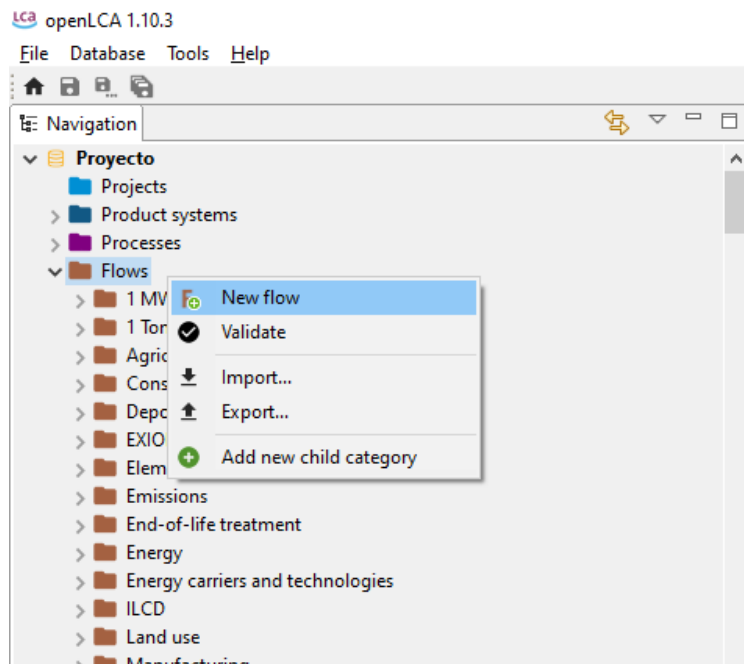


Fig. 27. Crear un nuevo flujo

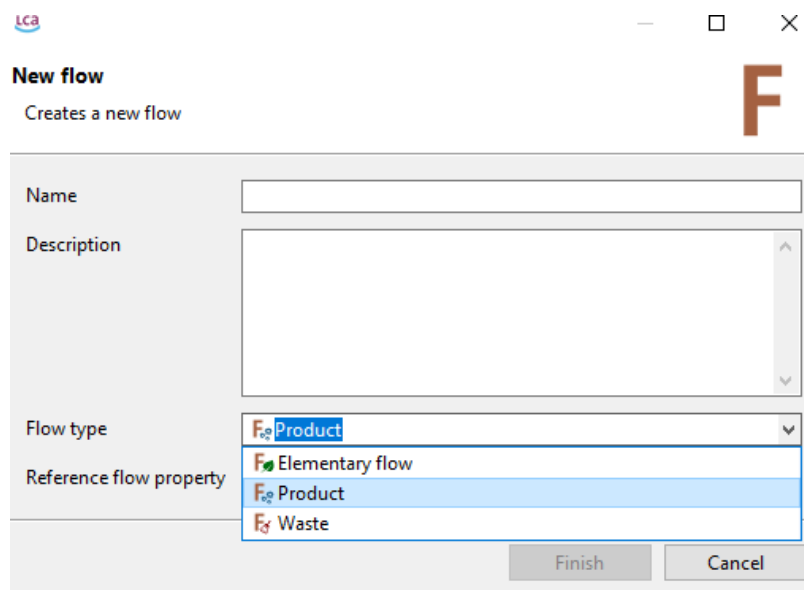


Fig. 28. Crear tipo de flujo

3 Creación de un proceso del sistema:

Una vez creado el flujo, se puede crear el proceso asociado a él, ver Fig.29.

Welcome CARBÓN PRODUCIDO - SIN COLECTORES

General information: CARBÓN PRODUCIDO - SIN COLECTORES

General information

Name: CARBÓN PRODUCIDO - SIN COLECTORES

Description:

Category: 1 Tonelada de Vapor de Agua > SIN COLECTORES

Version: 00.00.001

UUID: 64e42842-8d26-4175-9f7d-1075654d0a62

Last change: 2020-12-05T23:50:43-0500

Infrastructure flow: ☐

Flow type: Product

Create process

Fig. 29. Creación de procesos

Posteriormente, se asigna un nombre al proceso y se selecciona “finish”, como se muestra en la Fig. 30.

LCA

New process

Name: PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBÓN

☐ Create a waste treatment process

☐ Create a new flow for the process (as quantitative reference)

Quantitative reference:

- CARBÓN PRODUCIDO - SIN COLECTORES
- CARBÓN QUEMADO - SIN COLECTORES
- VAPOR DE AGUA PRODUCIDO - SIN COLECTORES
- > Agriculture, forestry and fishing
- > Construction
- > Deposited goods
- > EXIOBASE
- > End-of-life treatment
- > Energy
- > Energy carriers and technologies
- > ILCD

Finish Cancel

Fig. 30. Proceso creado

General information	Inputs/Outputs	Administrative information	Modeling and validation	Parameters	Allocation	Social aspects	Impact analysis
---------------------	----------------	----------------------------	-------------------------	------------	------------	----------------	-----------------

General information: PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CARBÓN - SIN COLECTORES

General information

Name: PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CARBÓN - SIN COLECTORES

Description: First created: 2020-12-06T12:58:44
Linking approach during creation: Prefer default providers; Preferred process type: System proce

Version: 00.00.000

UUID: 99fd7d0f-0f84-45a5-b52e-6a072bd16502

Last change: Calculate

Reference

Process: P PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CARBÓN - SIN COLECTORES

Product: F CARBÓN PRODUCIDO - SIN COLECTORES

Flow property: Δ Number of items

Unit: Item(s)

Target amount: 1.0

General information | Parameters | Model graph | Statistics

Fig. 32. Creación del producto del sistema.

Una vez verificados los flujos, se da clic en el botón calcular mostrado en la Fig. 32, y se procede a seleccionar el método de evaluación de impacto, como se muestra en la Fig. 34. También se ve el método de asignación para realizar un análisis de sensibilidad básico. Luego de seleccionar el método de impacto, dar clic en “finish”.

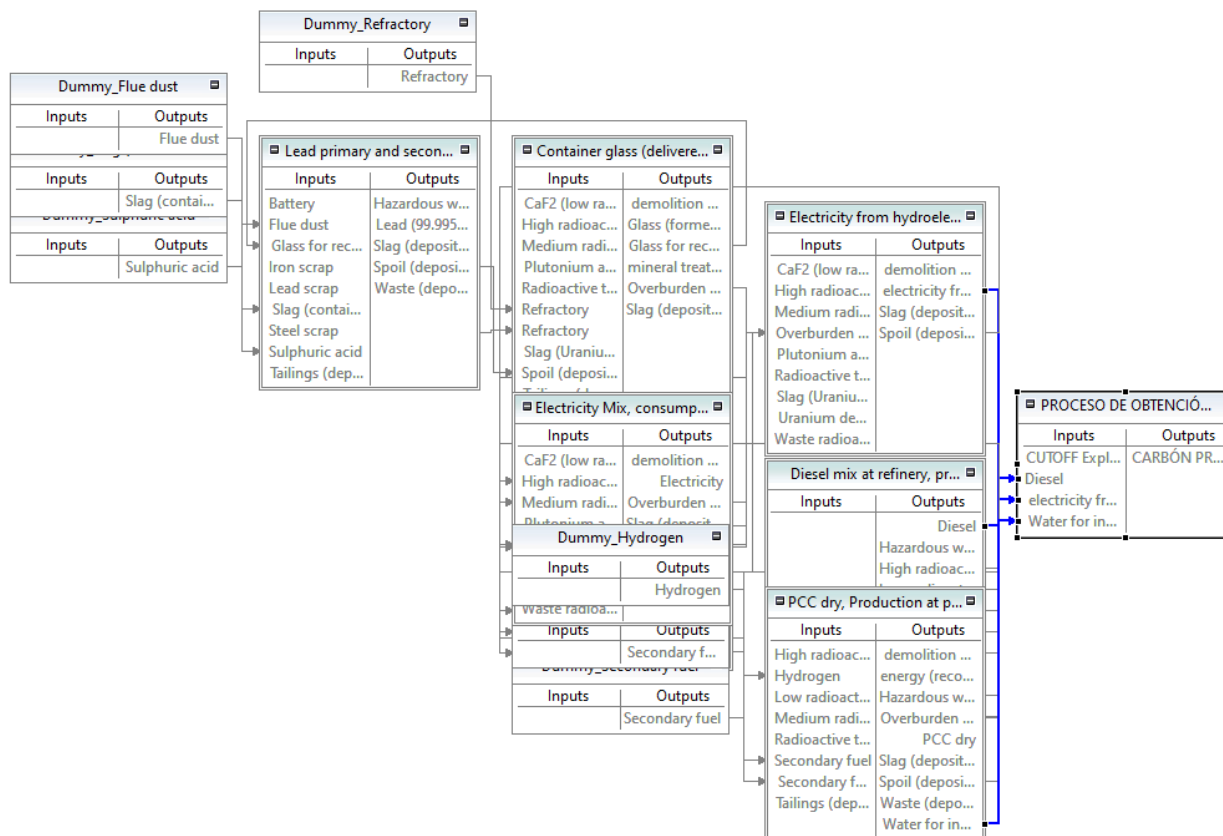


Fig. 33. Model graph

LC3 Calculation properties

Calculation properties

Please select the properties for the calculation

Allocation method: Physical

Impact assessment method: IPCC 2013 GWP 100a

Normalization and weighting set: IPCC 2013 GWP 100a

Calculation type: IPCC 2013 GWP 20a

IPCC 2013 no LT

Motoshita et al 2010 (Human Health)

Pfister et al 2009 (Eco-indicator 99)

Pfister et al 2009 (Water Scarcity)

Pfister et al 2010 (ReCiPe)

< Back Next > Finish Cancel

Fig. 34. Método de evaluación de impacto

5 Evaluación de impacto y resultados:

Finalmente se obtienen los resultados de impacto, ejemplo ilustrado en la Fig. 35. Se repite el mismo procedimiento con los demás procesos y se conectan hasta tener uno integrado (ver Fig. 33).

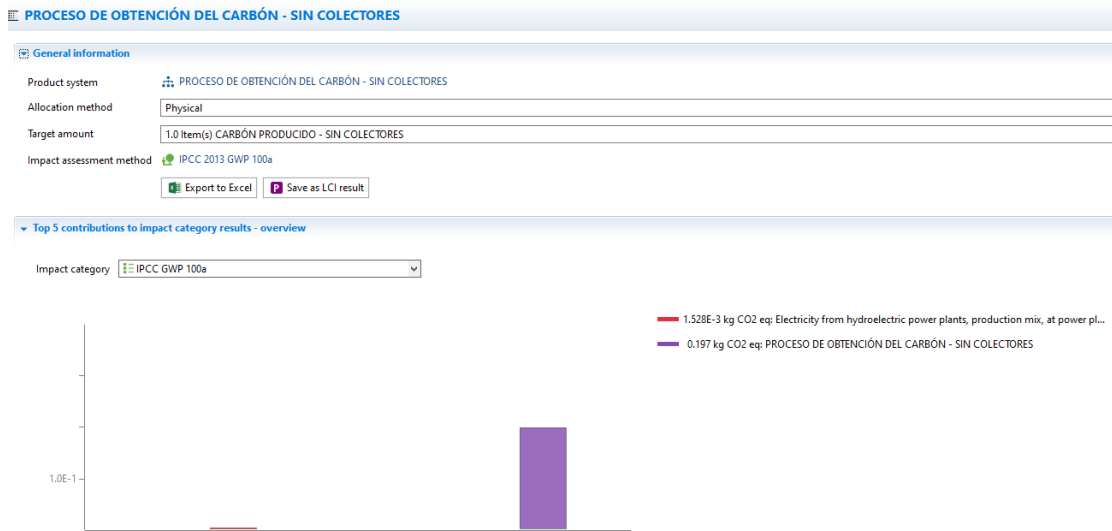


Fig. 35. Resultados

Finalmente, se obtiene el árbol de todos los procesos conectados, como se muestra en la Fig. 36.

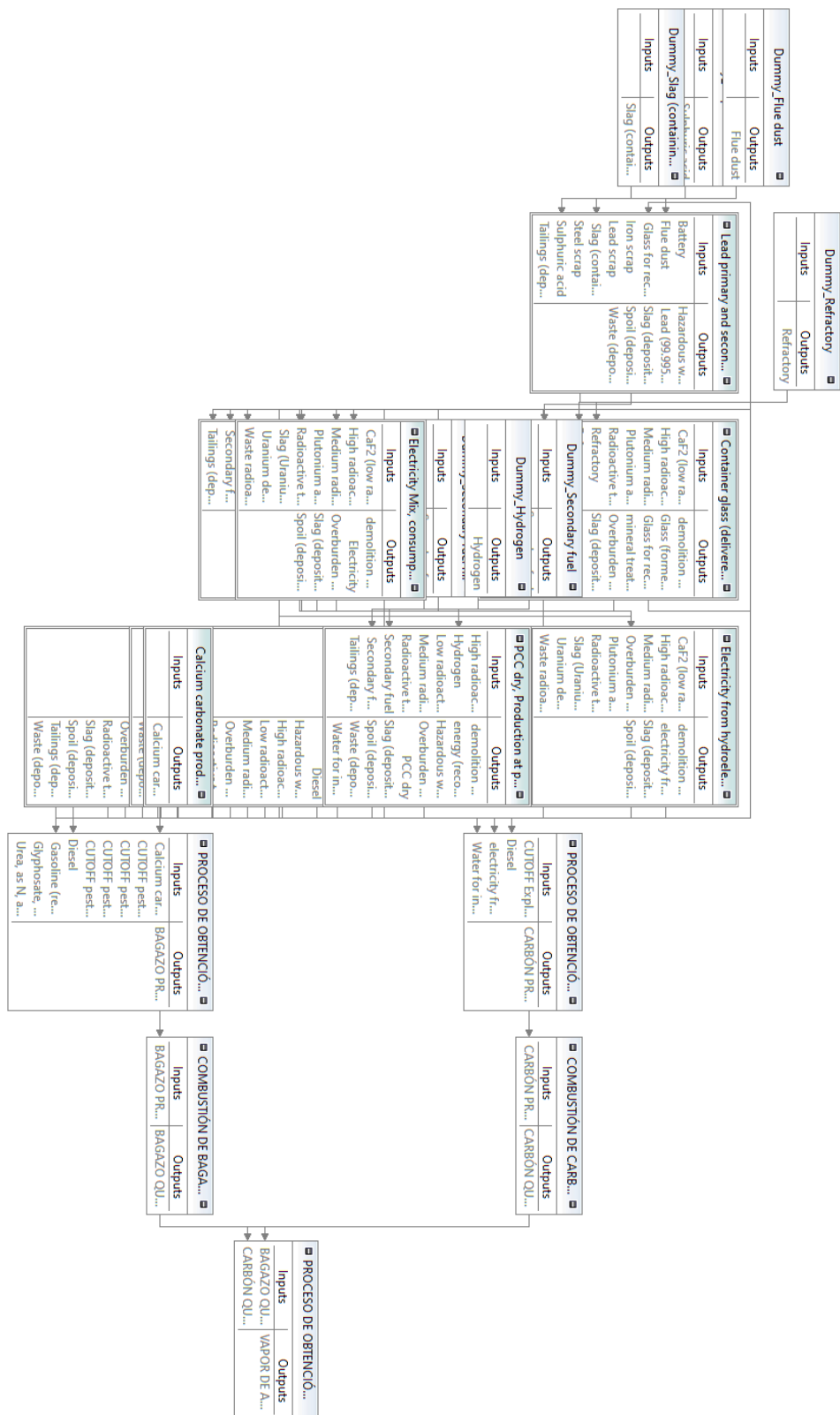


Fig. 36. Árbol de proceso final